FERIC

FOREST ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE OF CANADA
INSTITUT CANADIEN DE RECHERCHES EN GÉNIE FORESTIER

THE DEVELOPMENT AND TRIAL OF TWO PROTOTYPE MACHINES (RECUFOR AND LRP) FOR FOREST BIOMASS RECOVERY

by

André Du Sault, F.E.

-00257/

THE DEVELOPMENT AND TRIAL OF TWO PROTOTYPE MACHINES (RECUFOR AND LRP) FOR FOREST BIOMASS RECOVERY

by

André Du Sault, F.E.

Special Report No. SR-36

ENFOR Project P-210

December 1985

© Copyright 1985, Forest Engineering Research Institute of Canada

ISSN 0381-7733

Available from:

Forest Engineering Research
Institute of Canada
143 Place Frontenac
Pointe Claire, Québec
H9R 4Z7

ENFOR Secretariat
Canadian Forestry Service
Ottawa, Ontario
K1A OE&

FOREWORD

This report gives an account of the development of two prototype machines (RECUFOR and LRP) aimed at recovering forest residues left on the logging site and at the roadside. FERIC's Special Projects Division had overall responsibility for this joint FERIC/ENFOR project. The firm "Logging Development Corporation (LDC)" from Montreal was contacted by FERIC to design, build and test the two prototypes.

The author's role was solely to produce this final report based on the various background documents available.

TABLE OF CONTENTS

	Page
FOREWORD	i
SUMMARY	iii
I. INTRODUCTION AND BACKGROUND	1
II. THE RECUFOR	4
A. First Model	4
B. Description of RECUFOR Prototype	7
C. Evaluation of RECUFOR	12
D. Change of Context	22
III. LRP (Logging Residue Processor)	25
A. Generalities	25
B. Prototype Description	25
C. Preliminary Evaluation of LRP	28
CONCLUSIONS	31
BIBLIOGRAPHY	32
APPENDIX I - RECUFOR SPECIFICATIONS	33
APPENDIX II - LRP SPECIFICATIONS	34
APPENDIX III - DEFINITION OF TIME ELEMENTS	35
APPENDIX IV - ANALYSES OF HOGGED SLASH	36

SUMMARY

The energy potential of forest biomass was brought to the forefront at the end of the 1970's, during a time of increased interest in renewable energy sources. Within the framework of a FERIC/ENFOR agreement, FERIC was given the responsibility to develop a technology aiming at the recovery of logging residues and their reduction into a form compatible with conventional energy conversion systems.

The RECUFOR prototype (a mobile collecting, comminuting and transporting unit) was built in 1982 as the result of the first stage of the project. The RECUFOR was capable of doing the following:

- enter the logging site and recover, with a collecting drum, on-the-ground logging residues such as tops, branches..., on cutovers;
- comminute this material into sizes suitable for handling;
- store, transport and unload residues at roadside.

On the whole, the prototype performance during the trials established that the basic concept of recovering residues left on logging sites was technically feasible, but that the recovery costs for this type of biomass were too high to develop this machine further towards a commercial unit.

A second prototype, called the Logging Residue Processor (LRP), was then built in order to follow the change of world energy needs and Canadian logging practices that occurred in the 1980-82 period. The LRP is a self-propelled machine, which travels on logging roads recovering residues left at roadside after whole-tree delimbing operations. It is equipped with a two-stage reduction process (shearing and hammer milling), with before-and-after reduction handling facilities.

Some preliminary tests on the LRP were undertaken in 1984, and the test results indicated that a productivity level of 20 green tonnes/SMH could be reached if some modifications on the prototype were made.

I. INTRODUCTION AND BACKGROUND

The world energy situation prevailing in the 1970's prompted the Canadian government to establish programs encouraging the use of renewable sources of energy and to develop the necessary technology. Inventories carried out to assess the amount of residues left in the woods, either at the cutting site or roadside, showed these residues constituted a good potential source of renewable energy.

Forest biomass includes mill residues (sawdust, bark, liquors, etc...) and logging residues such as branches and tops. Logging residues have several disadvantages over mill residues: they are usually less accessible, they are regularly contaminated with foreign matter (soil, rocks...) and their heterogeous nature entails additional problems in their transformation. Thus, they generally constitute a more expensive form of forest biomass to exploit. However, in view of the steady increase of world oil prices (Figure 1) in the 1970's and given our limited supplies of fossil fuels, logging residues became economically more attractive and were clearly seen as a potential substitute for conventional energy.

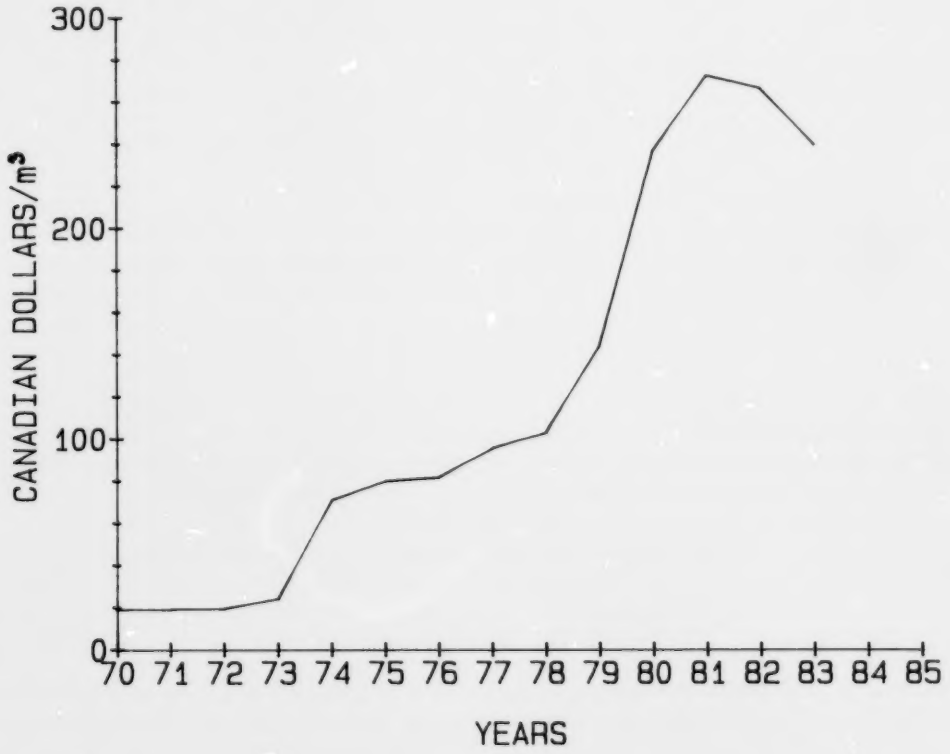


Figure 1. Averaged cost of imported crude oil in Montreal.

Location and type of logging residues available are greatly influenced by the harvesting* system used. Figure 2 presents the percentage of total roundwood production in Canada for each of the three usual harvesting systems. From 1975 to 1980, more than 80% of the total annual production was done by means of the shortwood and tree-length systems. Since both these systems leave large quantities of residues on the logging site (Table 1), priority was given to the development of technology to recuperate such residues from the cutovers.

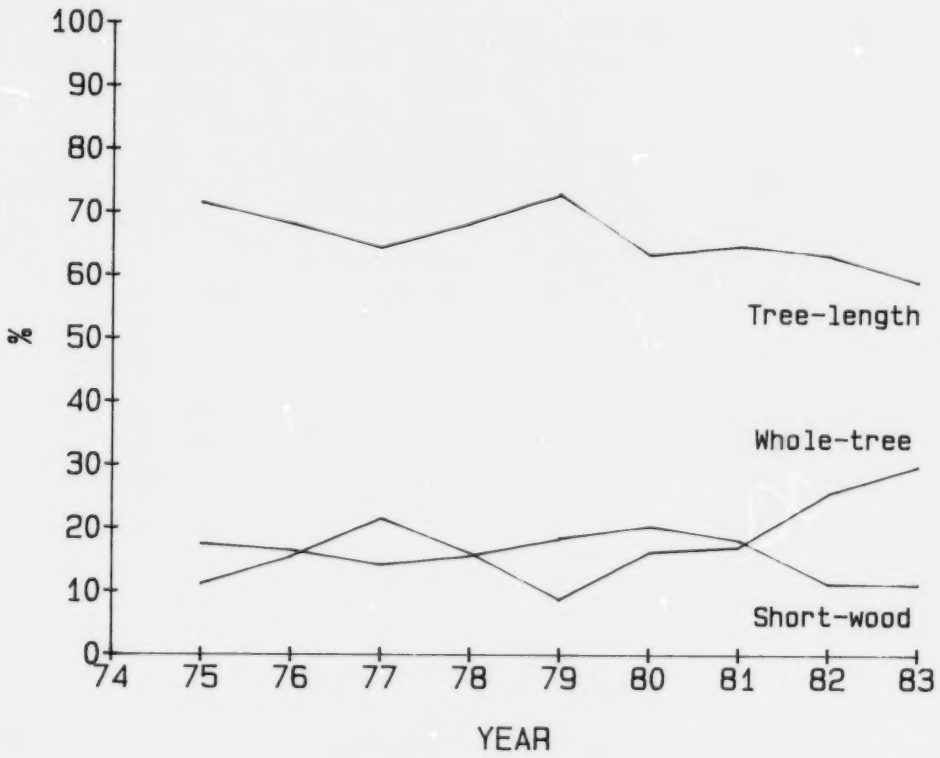


Figure 2. Percentage of total annual roundwood production in Canada for each harvesting system (C.P.P.A. 1984).

* Harvesting systems are defined according to the degree of processing performed at the stump. In the shortwood harvesting system, the tree is cut, limbed and bucked at the stump into pre-determined lengths. In the tree-length system, the tree is cut, limbed and transported to roadside without being sectioned. In the whole-tree system, the tree is cut and transported to roadside without further processing at the stump.

Table 1. On-the-ground logging residues (o.d.t./ha) left by harvesting systems on a black spruce station (F.R.U.L. 1981).

Harvesting system	tops (t/ha)	branches (t/ha)	green stems (t/ha)	dry stems (t/ha)	total residues (t/ha)	relative proportion to full-tree
Tree-length	26.2	11.6	6.1	9.9	53.8	2.6
Shortwood	11.1	22.0	21.8	15.8	70.7	3.4
Full tree	1.2	3.2	7.9	8.4	20.7	1.0

In 1979, FERIC was mandated, under the ENFOR program, to undertake a research and development program aiming at the recovery and processing of forest biomass for energy. More specifically, FERIC was to develop an experimental machine capable of the following:

- recover on-the-ground residues like tops and branches using a collecting drum;
- reduce this material for bulk handling;
- accumulate, transport and unload the residues at roadside;
- have low energy requirements.

In March 1980, the model of a prototype was presented to ENFOR and it was decided to test the main component of the concept, i.e. the toothed drum, that summer. Test results validated the concept. FERIC subsequently undertook to design and build an experimental prototype machine. This phase was contracted to the firm "Logging Development Corporation" from Montreal. The design was completed by spring 1981 and the prototype, called the RECUFOR, was ready for field testing during the summer of 1982. On the whole the performance of this prototype conformed to expectations.

However, changes in the energy context, as well as new trends in harvesting systems appearing in the period 1981-82 (Figures 1 and 2) changed the focus of the program to the utilization and transformation of residues piled at roadsides. As the full tree system gained importance in Canada, FERIC asked LDC to design a new prototype machine that would be self-propelling, self-loading and possess a two-stage reduction process. This prototype, currently named the Logging Residue Processor (LRP), was built in 1983 and put on trial for a brief period in 1984. The results were promising and a more complete evaluation is likely to be conducted in the near future.

This report describes the different stages of development of the RECUFOR, and to a lesser extent those of the LRP, during the five-year period of 1979-84.

II. THE RECUFOR

A. First Model

1. Introduction of concept

In 1980, FERIC was presented with the model of a machine, illustrated in Figure 3, capable of gathering and comminuting logging residues and of transporting them to a landing. The collecting principle, brought forward by Mr. Armand Morin from "Les Broyeurs A.M." of Val d'Or (Quebec), consisted of two end-to-end drums equipped with long curved blades, for picking up on-the-ground residues. A chipper mounted at the rear of the drums would comminute residues collected by the drums.

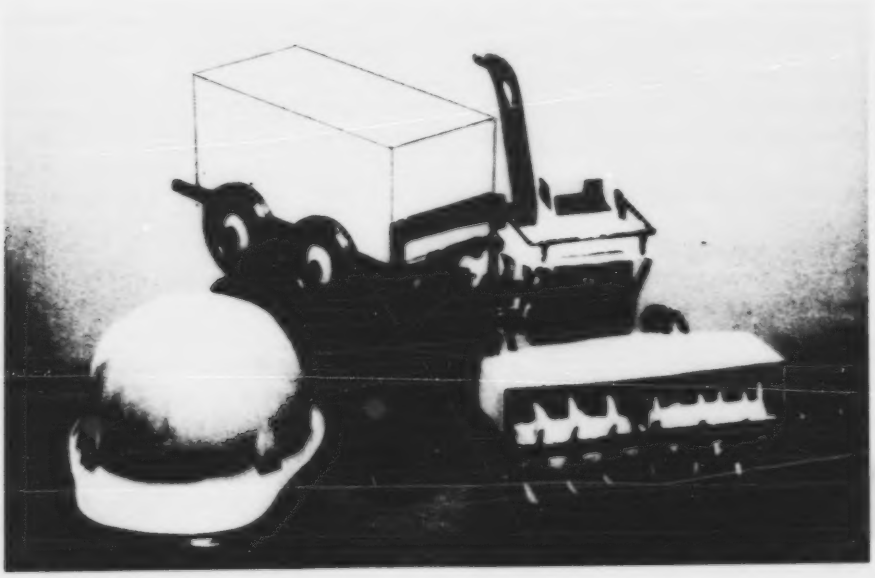


Figure 3. First model of RECUFOR.

Following the presentation of the model, it was decided to field test the collector assembly that summer and to evaluate the practicality of the gathering concept.

2. Field tests of the collecting drum

The collecting drum assembly was built by "Les Broyeurs A.M.", with technical assistance provided by LDC. The unit consisted of a single rotor equipped with 15 curved blades, spirally distributed about its circumference. A set of fixed knives was mounted behind the rotor to sever woody residues carried around by the rotor arms into 30 cm-or-so pieces. For test purposes, the rotor was mounted at the front end of a Hydro-Ax 400 loader. Because the rotor proved too heavy for the loader lifting capacity, a set of supporting wheels was added to each side of the rotor (Figure 4).

Figure 4. Field testing of collecting rotor (landing conditions).

On August 27, 1980, in Val d'Or (Quebec), a group of ENFOR and industrial representatives gathered to witness the first trials of the collecting rotor. Forest residues, consisting of tops, branches and trunks from both softwoods and hardwoods, had been spread over flat sandy terrain so as to simulate broadly logging site conditions. Trial results proved that the rotor-equipped, crescent-shaped blades collect such residues and achieve a primary reduction. The next action was to test the rotor over a real logging site before any further development would take place. The rotor was transferred to the front blade of a Terex 82-50 dozer (Figure 5). This new assembly was necessary as the rotor had to be regularly adjusted upward and downward to follow terrain irregularities and avoid large stumps found on cutovers.

Figure 5. Collecting rotor on dozer (cutover conditions).

The second series of tests led to the following conclusions:

1. Biomass residues from a cutover could be gathered by rotating toothed drums with satisfactory efficiency.

2. Because of the random orientation and the physical characteristics of the pieces being gathered, transfer of this material from rotor to bin might present specific problems.

3. Design of transportation and storage components must reflect the low bulk density of the material collected.

It was then recommended to continue development of the RECUFOR. To this end, ENFOR Project P-210 was instituted, under which a full scale prototype was to be built and field tested. Project objectives were stated as follows:

1. Undertake a comprehensive evaluation of the collecting rotor under extensive field trials and various ground conditions.

2. Evaluate design of the main active components of the prototype and suggest corrective actions for any problem identified.

3. Determine whether the revolving action of the rotor on the ground surface would facilitate site preparation and reforestation activities.

Moreover, it was suggested that other means to use the collecting rotor than horizontally be investigated, and other practical applications for the rotor be defined.

B. Description of RECUFOR Prototype

1. Concept retained

The final concept selected differs slightly from that of the original model. It is characterized by the rotor and the conveyor mounted on the front section of the frame, the bin on the middle, and the engine on the rear section. A conventional wheeled skidder (Clark 880) was used to form the main frame of the prototype machine. The bin was inserted at the steering point, and the cabin, conveyor and rotor were mounted cantilevered over the front end (Figures 6 and 7).

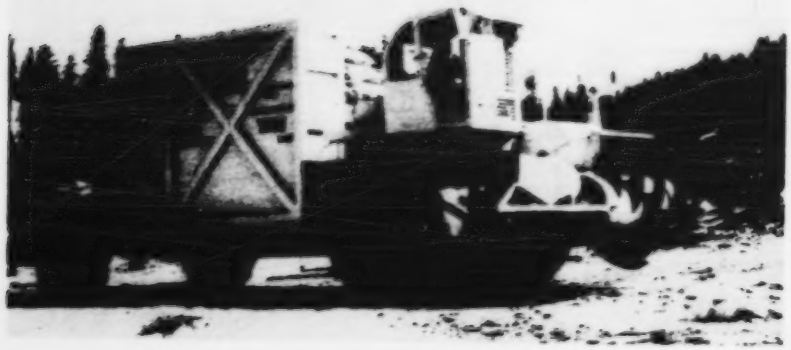


Figure 6. Sideview of RECUFOR.

The RECUFOR's collecting principle is as follows. Logging residues are picked up by the curved blades and are carried away towards the rear. As the blades reach the rear deck supporting a series of knives, residues are severed and fall on the inclined deck (Figure 8). To prevent any build up of material about the knives, a series of impellers spread out the passage of residues. After sliding down the deck, residues are caught up by the conveyor belt and transported up to the bin.

The evaluation of the original concepts, as proposed by Mr. Morin, revealed some technical problems would complicate the construction of the full prototype in its original version. Modifications to the original concept were made, and the principal changes will be found in the description of the RECUFOR following in the next sections. RECUFOR's critical components were first built and shop tested to correct any malfunctioning before final assembly.

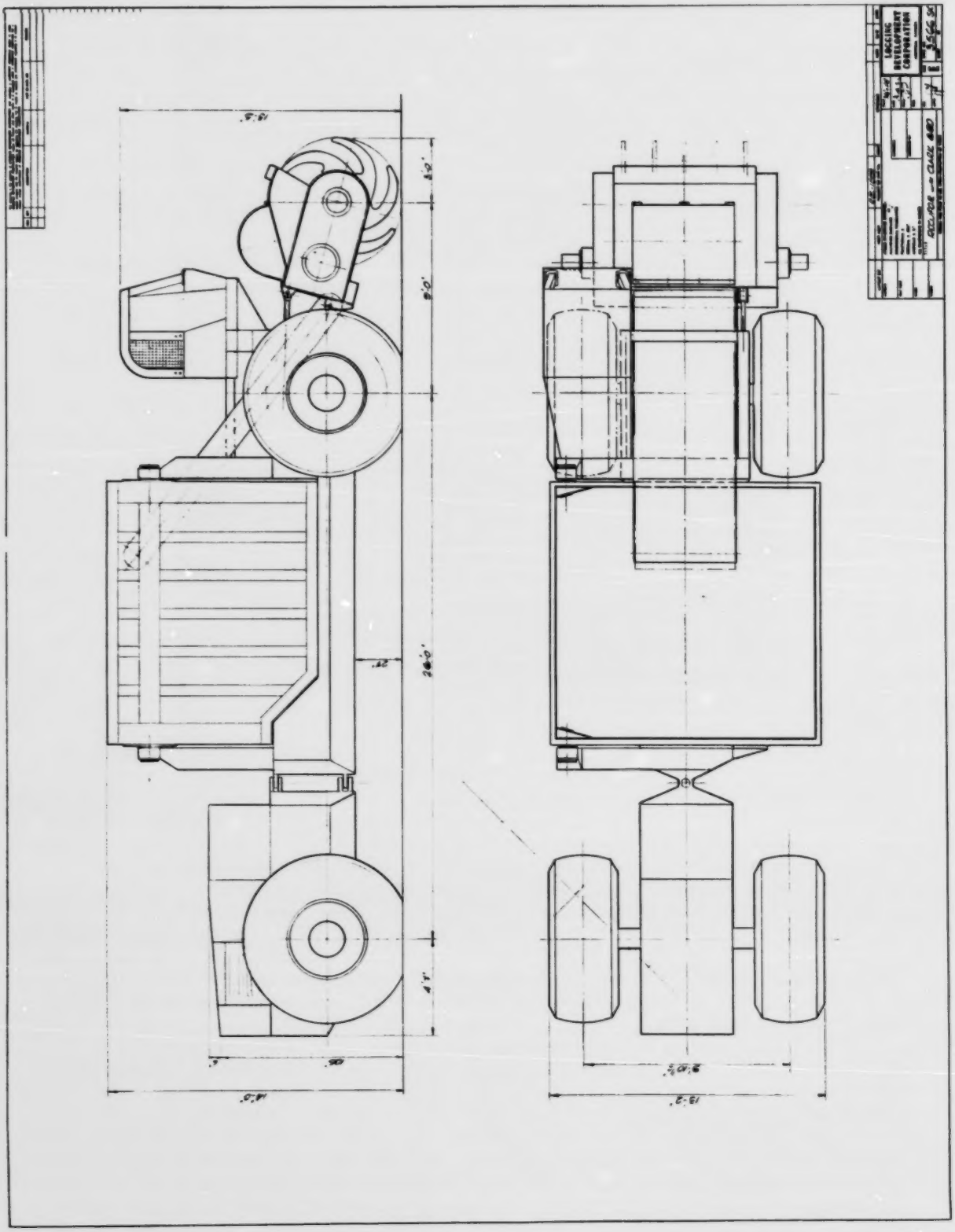


Figure 7. Design of RECUFOR.

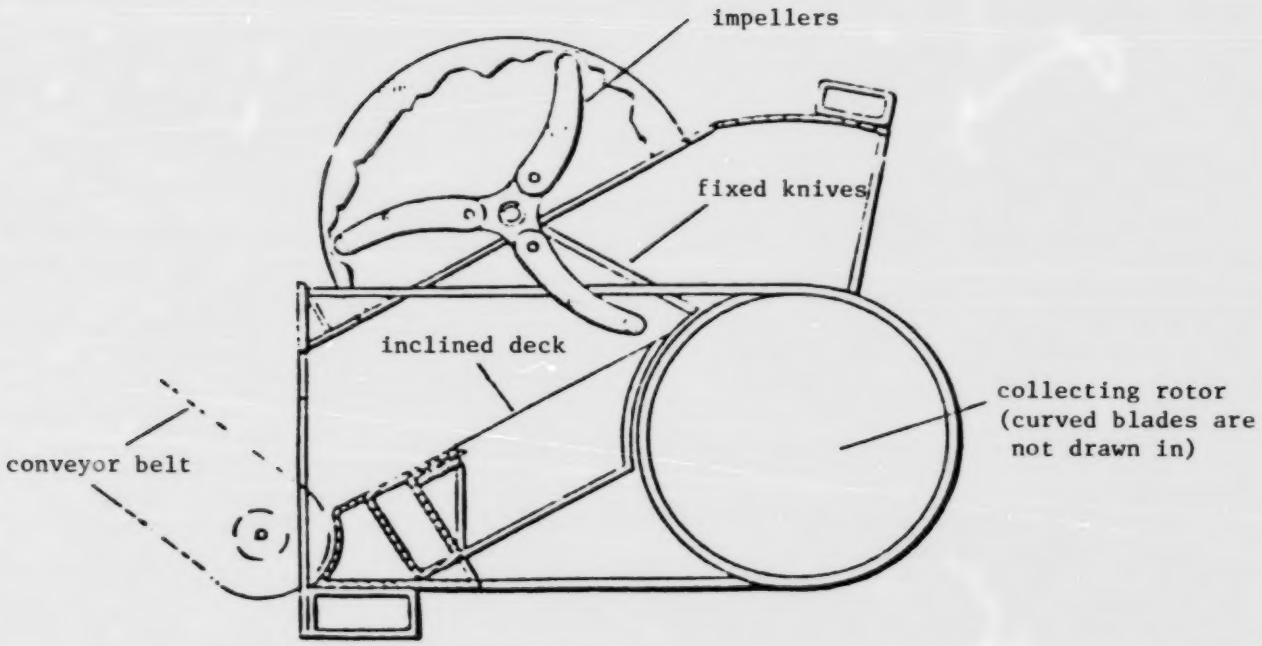


Figure 8. Rotor assembly.

2. Collecting rotor

The collecting rotor previously built was reused on the RECUFOR, mainly for economic reasons. Blade tips were bevelled and sharpened to reduce hook-ups in stumps. Figure 9 illustrates the design of the rotor. A second chain drive identical to the existing one, was added to the rotor at the other end.

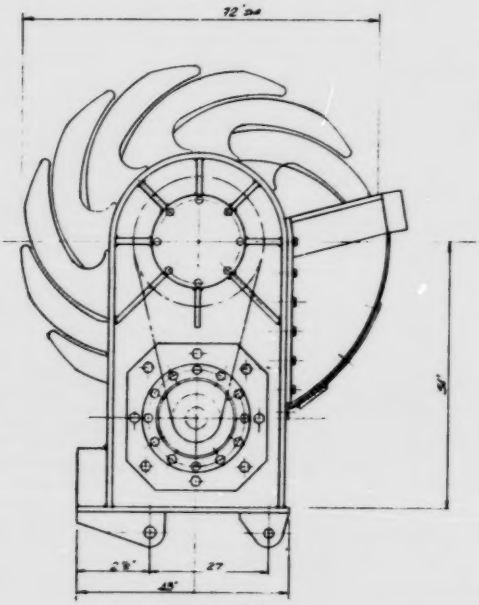


Figure 9. Design of collecting rotor.

Transfer of residues from rotor to conveyor did not turn out to be trouble free. When blades were passing through slots, residues tended to jam up the slots, causing the rotor to stop. The fixed knives were then installed at the edge of slots in such a way that each knife was paired to a blade, acting as a shear and anvil arrangement. Although this corrected one jam problem, it appeared that the sweeping force of the blades was not always sufficient to push the severed residues down the deck, hence the reason for the continual build-up. As an additional transfer mechanism became necessary, several were tested. The one which best solved the problem was the overhead impeller system with flinging arms (Figure 9).

3. Secondary reduction

Whereas the initial model proposed a chipper or a hammer mill to further comminute the material severed by the knives and blades, none was incorporated in the RECUFOR. A secondary comminution system would have increased the complexity of the machine handling system, especially for the funelling of cut residues from rotor to chipper. Power requirements would also have had to be augmented substantially. It also avoided questions relating to chip characteristics when randomly oriented pieces are fed to a chipper at this stage in the machine's development. However, in this situation the harvested residues will likely require a further reduction process before conversion to energy, adding one more stage in the handling process.

4. Bin

The bin is an integral part of the RECUFOR rather than a replaceable container as in the original concept. When loaded, the RECUFOR travels to roadside, where it dumps. The dumping arrangement is over-the-side and high enough so the material can be deposited in another container (Figure 10). This arrangement was quite satisfactory for a prototype.

5. Steering system

A frame steer system was chosen as in the original model. The hinge point, however, was placed toward the rear of the machine rather than the middle, so as to have the rotor, the conveyor and the bin on the same section. This simplified material handling from rotor to bin and allowed better weight distribution. A central hinge point would have required the construction of a whole new frame instead of using a conventional skidder as the main frame for the RECUFOR.

6. Driving system

Preliminary tests in the plant yard showed the first gear from the skidder's transmission to be too fast for its use as the prototype harvesting speed. The hydrostatic transmission powering the rotor was transferred to the drive line and a combination of auxiliary hydraulic circuits was added to power the rotor.

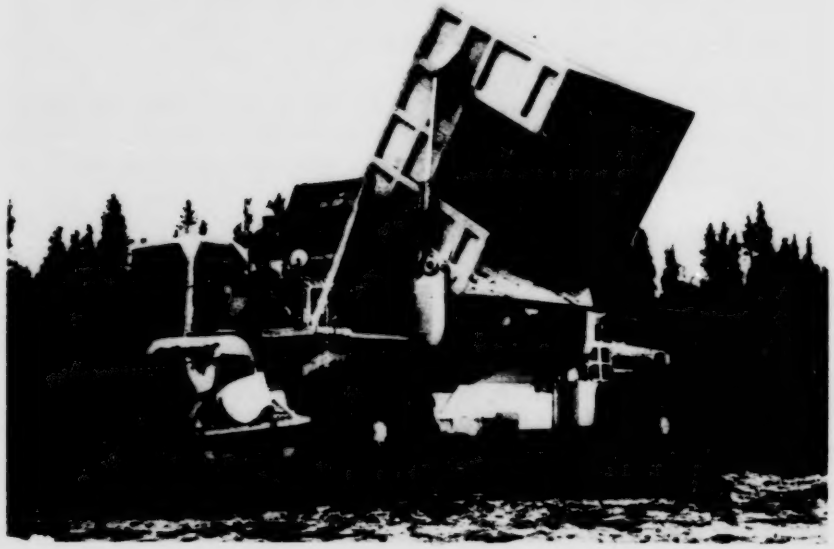


Figure 10. Over-the-side dumping of a RECUFOR load.

7. Weight

Total weight of RECUFOR was 37 750 kg, and indeed deemed excessive. Several modifications would help to reduce this weight to a more acceptable level:

1. Because of the low bulk density of collected material, design of the bin could be modified to cut its weight.

2. The main frame could be specifically designed to better meet the RECUFOR's gathering functions and requirements.

3. Hydrostatic transmissions could be used for all driving functions.

Even with a more powerful engine, it should be possible to bring down the weight of a pre-commercial unit to within the 29 000 to 30 000 kg range.

C. Evaluation of RECUFOR

The evaluation of the RECUFOR took place from July to September 1982. The test area was located on the C.I.P. Inc. (St-Maurice Division) limits near Camp Lac Elaine, approximately 200 km north of La Tuque (Quebec).

When operated for the first time, a new prototype is subject to frequent mechanical breakdowns. Therefore the first part of the trials consisted of a technical assessment of the prototype. The second part then, was a short productivity study.

1. Summary of the technical evaluation

During the first few weeks of testing, more than 80% of all technical problems encountered were linked to the hydraulic system. Many hydraulic leakages and hose ruptures were recurring at the same connecting points, indicating that some parts of the hydraulic system were inadequate and required redesign. The addition of relief valves and accumulators as temporary measures did not solve the problems. Because of this poor functioning, other parts were not operating at full capacity:

1. The collecting rotor lacked power at times for it stalled frequently.

2. The hydrostatic transmission could not transmit full power to the driving wheels: measured travel speed of RECUFOR was 0.6 km/hr whereas estimated travel speed was approximately 1.6 km/hr.

Other problems were also noted during that period and are described herein:

- appropriate manipulation of the rotor elevation was impaired by inadequate visibility. When the rotor was too high only the top portion of residues could be gathered whereas when too low, part of the organic soil was picked up, thus contaminating the woody material. Moreover the crescent-shaped blades tended to up-root stumps, which invariably stalled the rotor. The tips of the blades were then bevelled and sharpened so they could split the stumps instead of hooking them up;
- other pieces than stumps could cause this stalling of the rotor:
  . trunks with diameter larger than 20 cm,
  . trunks entering the rotor at right angle with the rotor axle would avoid being severed by the knives and jam the rotor housing;
- bin capacity was not fully used because residues transferred by the conveyor accumulated in a cone-shape manner and did not spread over as anticipated;
- capacity of the conveyor was, at times, insufficient for the amount of residues collected by the rotor. This led to system blockages which would slow down productivity.

In view of the many problems encountered, trials were interrupted in August for a thorough revision of the hydraulic system and correction of other problems relating to the driving system.

2. Summary of performance testing

Tests resumed in September '82 in the same area with the FERIC staff undertaking a short performance study, which was somewhat affected by mechanical breakdowns, although these were less frequent than before.

Test conditions

The test site consisted of a 2.2 ha cutover, harvested in the 1980-81 season with Koehring shortwood harvesters. The original stand was made of black spruce (Picea mariana [Mill.] B.S.P.) and jack pine (Pinus banksiana Lamb.), with volume averaging 90 to 130 m^3/ha and height averaging 15 to 18 m.

The ground was flat and clear of obstacles (Figure 11). Terrain was classified 1, 2, 1 according to the C.P.P.A. terrain classification (Mellgren 1980). There were no residuals or boulders; stumps were the only obstructions of note. A summary of ground conditions, based on six 50-m^2 plots (sampling intensity = 1.4%) is presented in Table 2.

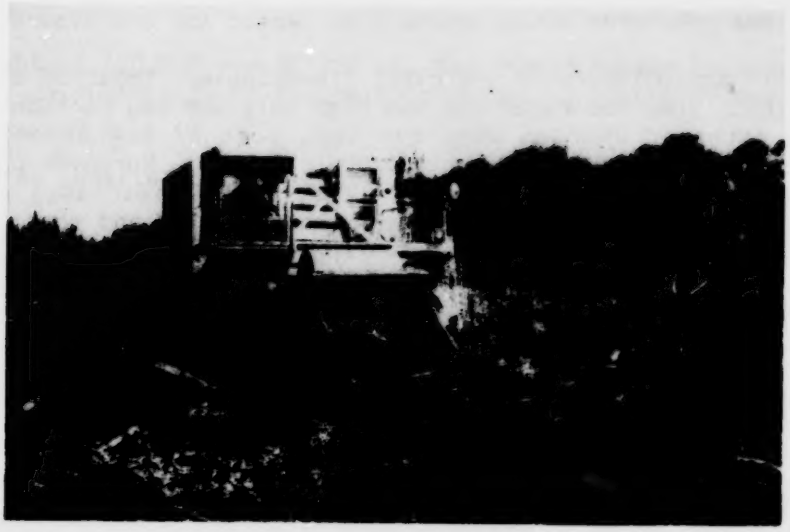


Figure 11. RECUFOR operating in testing site.

Table 2. Summary of ground conditions.

SOIL CHARACTERISTICS	
Average slope (%)	0
Soil texture	sandy
Moisture regime	dry
Average humus depth (cm)	7
Average depth of parent material (cm)	30+
GROUND ROUGHNESS	
Number of stumps per hectare	800
Average stump diameter (cm)	21.4
Average stump height (cm)	25.6
Ground roughness class (%)	
10-30 cm	75
30-50 cm	21
50-70 cm	4
BRUSH	
Number of saplings per hectare	200
Average height (m)	1.8

Before the outset of performance testing, logging residues averaged 29.4 cm in depth and covered approximately 41% of the cut over. Residues were generally laid out in parallel rows, typical of Koehring shortwood operations. Table 3 provides a fuller description of pre-recovery residues, based on a 400-m^2 sample plot (sampling intensity = 1.8%).

Table 3. Description of pre-recovery residues.

RESIDUE CLASS	GREEN WEIGHT (t/ha)	%
Branches	13.1	20
Trunks	51.7	80
Total	64.8	100

Study results

During the study period, a number of criteria served as the basis for the evaluation of the RECUFOR.

a. Machine speed

Machine speed was measured in different operating conditions. All tests were conducted with an engine speed of 2600 rpm and results are presented in Table 4.

Table 4. Machine speed tests.

STATIC TEST			
Speed of rotor (rpm)			17
Speed of conveyor (rpm)			13
MOBILITY TEST			
Test conditions	Drive	Time/100 m (min)	Speed (km/hr)
Clear-cut, flat	hydrostatic	3.10	1.94
Wet sand, flat	hydrostatic	2.98	2.01
	mech. 1st gear	1.02	5.88
	mech. 2nd gear	0.63	9.52
Road, flat	hydrostatic	2.83	2.12
Road, 9% uphill slope	hydrostatic	3.32	1.81
	mech. 1st gear	1.36	4.41

b. Productivity

Table 5 gives a summary of time elements (as defined in Appendix 1) and machine productivity as well as a description of operational factors prevailing during the 3-day productivity study. A summary of delays is presented in Table 6.

Table 5. Operational factors and production.

TEST CONDITIONS	Mean	Standard Deviation
Study date	September 1982	
Terrain classification	1.2.1	
Duration of time study (PMH)	6.4	
Number of loads	8	
Travel distance empty (m)	139	35
Number of strips per load	2	0.8
Total strip length per load (m)	212	46
Travel distance loaded (m)	148	88

TIME ELEMENTS	Time per load (min)		
	Mean	Standard deviation	%
Travel empty on road	2.55	1.22	5.3
Travel empty on cutover	1.80	1.05	3.7
Collection	20.15	1.96	41.7
Move between strips	3.23	3.08	6.7
Travel loaded on cutover	2.45	1.02	5.1
Travel loaded on road	1.69	1.16	3.5
Manoeuvre	0.48	0.61	1.0
Unloading	3.53	1.77	7.3
Delays*	12.45	6.62	25.7
Total time per load	48.33	9.58	100

PRODUCTION	Mean	Standard deviation
Volume per load (m^3)	20.5	5.3
Green weight per load (tonne)	2.73	0.60
Productivity (green tonne/PMH)	3.39	

* Delays only include those between 0.05 min and 15 min. Those less than 0.05 min were included in the element in which they occurred, while those over 15 min were not considered productive time and thus excluded from the sample.

Table 6. Summary of delays.

TYPE OF DELAY	CAUSE	DELAY TIME (min)	FREQUENCY	% OF TOTAL TIME
Lifting of rotor	branches	0.32	1	0.1
	stumps	1.50	3	0.4
	unknown	9.05	16	2.3
		10.87	20	2.8
Rotor jam	branches	14.44	4	3.7
	stumps	0.21	1	0.1
	volume	7.29	38	1.9
	unknown	7.86	28	2.0
		29.80	71	7.7
Conveyor jam	branches	9.79	2	2.5
	unknown	12.57	11	3.3
		22.36	13	5.8
Mechanical	conveyor blade	5.79	2	1.5
	others	11.70	5	3.0
		17.49	7	4.5
Cleaning residues		9.10	9	2.3
Operator		10.01	8	2.6
Total		99.63	128	25.7

c. Load characteristics

As indicated in Table 5, load weight averaged 2729 kg or 2.73 green tonnes of organic material. In addition, loads contained an average of 57 kg (2%) of mineral soil. Load volume averaged 20.5 m^3, with a mean density of 133 kg/m^3. Table 7 further identifies the nature of residues, and Figure 12 illustrates residues after unloading.

Table 7. Load characteristics (organic material).

TYPE OF RESIDUES	% OF TOTAL WEIGHT OF LOAD		MOISTURE CONTENT (% - DRY BASIS)
Branches		57.5	36.7
Trunks (7.5 to 17.5 cm dia.)			
length <40 cm	6.2		
length >40 cm	31.2	37.4	45.7
Trunks (17.5 + dia.)		0.2	40.8
Stumps		4.9	67.4
Total		100	41.6

Figure 12. Collected residues after unloading.

3. Discussion

Productivity of the RECUFOR prototype reached an average of only 3.39 green tonnes/PMH or 2.39 dry tonnes/PMH. Two main reasons may account for this low production rate. First, the collecting speed of the RECUFOR was much lower than expected; and second, the proportion of total time actuallly spent on collecting was rather low.

It had been anticipated that the RECUFOR would travel at a collecting speed of 1.6 km/hr, whereas in fact, the collecting speed averaged 0.63 km/hr in the study, meaning that only 40% of the projected area to be treated per collecting hour was covered.

Collection time made up only 42% of total productive time whereas delays represented 26% of total productive time. Jamming of the rotor or conveyor was responsible for 52% of total delay time, mainly because of stumps, trunks entering perpendicular to the rotor or excessive residues for the conveyor capacity.

Table 8. Productivity comparison between estimates (1980) and results (1981).

PRODUCTIVITY FACTORS	ESTIMATES 1980	RESULTS 1982
Width of rotor	1.83 m	1.83 m
Volume of bin	capacity: 40 m^3	used: 20.5 m^3
Speed of RECUFOR while collecting	1.6 km/hr	0.63 km/hr
Speed of RECUFOR while travelling	4.8 km/hr	2.5 km/hr
On-the-ground residue density (1980 estimates from FRUL-Black Spruce station)	112.8 green t/ha 56.4 dry t/ha	64.8 green t/ha 45.8 dry t/ha
Productivity	10.2 green t/PMH 5.1 dry t/PMH	3.39 green t/PMH 2.39 dry t/PMH

Because of poor spreading of the residues in the bin, load volumes reached an average of only 50% of the bin volume capacity resulting in a higher proportion of travelling and unloading times per unit of volume harvested.

With the following modifications, it is estimated that a productivity of 4.5 green tonnes/PMH could be reached:

- improve design of rotor blades and cutting arrangement in order to minimize rotor jams and material contamination; proportion of delays should be brought down to the 10% level of cycle time as for operational machines;
- modify design of conveyor for increased capacity and install a spreading system promoting full use of bin;
- reduce total weight of RECUFOR (refer to p. 12);
- increase engine horsepower of RECUFOR.

It should be noted that the test results, and those anticipated after modifications, apply to almost ideal terrain conditions (flat solid ground with no major obstacles). It is likely that the productivity of the RECUFOR would decrease under worse conditions. Therefore the modified version of RECUFOR should be tested in various slope and residue density conditions. The RECUFOR's high ground pressure could prevent its use in soft-ground conditions.

Logging Development Coporation estimated, in June 1983, that the purchase cost for an operational RECUFOR would amount to approximately $400 000, and that the machine operation costs would be as follows:

Machine operating cost calculation (June 1983)

Capital cost	$400 000
Life	20 000 hours
Operating hours/year (no winter operations)	2 000 hours
Repair as % of depreciation	200%
Average investment	$200 000
Interest & insurance as % of average investment	12%/year
Direct labour cost	$15/hour
Fuel and lubricants	$0.50/L

Operating cost

Depreciation 400 000/20 000	$20/hour
Interest and insurance 200 000 x 0.12/2000	$12/hour
Repairs and maintenance 2 x 20	$40/hour
Fuel and lubricants 70L x 0.50	$35/hour
Operator	$15/hour
Total	$122/hour

Using a mean heating value of 20 MJ/kg for dry residues actually collected (Kryla 1984), the calorific value of the 2.39 dry tonnes collected per hour would then be 45 000 MJ. Applying an energy recovery factor of 70% because of the moisture content of the residues (Tillman 1981), the recoverable energy value per hour becomes 31 500 MJ/hr. Energy recovery cost would then equal $122/hour ÷ 31.5 GJ/hour or $3.87/GJ.

In January 1985, 1 m^3 of crude oil cost $253.31 in Montreal. The average energy value of one m^3 of crude oil being 39.5 GJ/m^3, we can calculate a cost of $6.38/GJ.

The energy recovery cost at$3.87/GJ (for ideal conditions) makes up already 60% of the energy market value of $6.38, leaving a slim margin to absorb costs relating to transport of residues to the utilization site, a secondary reduction process, material handling to the boiler, etc...

Giving the current level of development of the RECUFOR, it seems that the trials carried out in the summer 1982 showed it was technically feasible to gather residues left on cutovers, but the concept application was not supported by its economics and profitability assessment.

D. Change of Context

The conditions that led to the set up of the ENFOR programme changed in two significant ways during 1980-82, the period of the RECUFOR's development and evaluation.

First, the international price for crude oil reached a ceiling in 1981 and regressed slightly thereafter (Figure 13), taking by surprise the price-climbing forecasts by experts. This move in oil prices suddenly made replacement energy sources economically less attractive, especially those requiring several handling and transformation steps before utilization, such as logging residues on cutovers.

Secondly, 1979 marked the year when the full tree system started gaining importance over the other two systems (Figure 14), passing from 9% of total roundwood production in 1979 to nearly 30% in 1983. The growing number of roadside delimbers suggest this trend is likely to continue in the next years. The shortwood system is expected to decrease slowly. The whole tree chipping method might also gain more acceptance by present and future users. These changes in harvesting systems have an impact on the location of logging residues.

In the full tree harvesting system, trees are mechanically delimbed at roadside, thus concentrating residues (tops, branches and trunks) in one easily-accessible area. This concentration of residues is an obvious advantage over residues left on the logging site by the shortwood system.

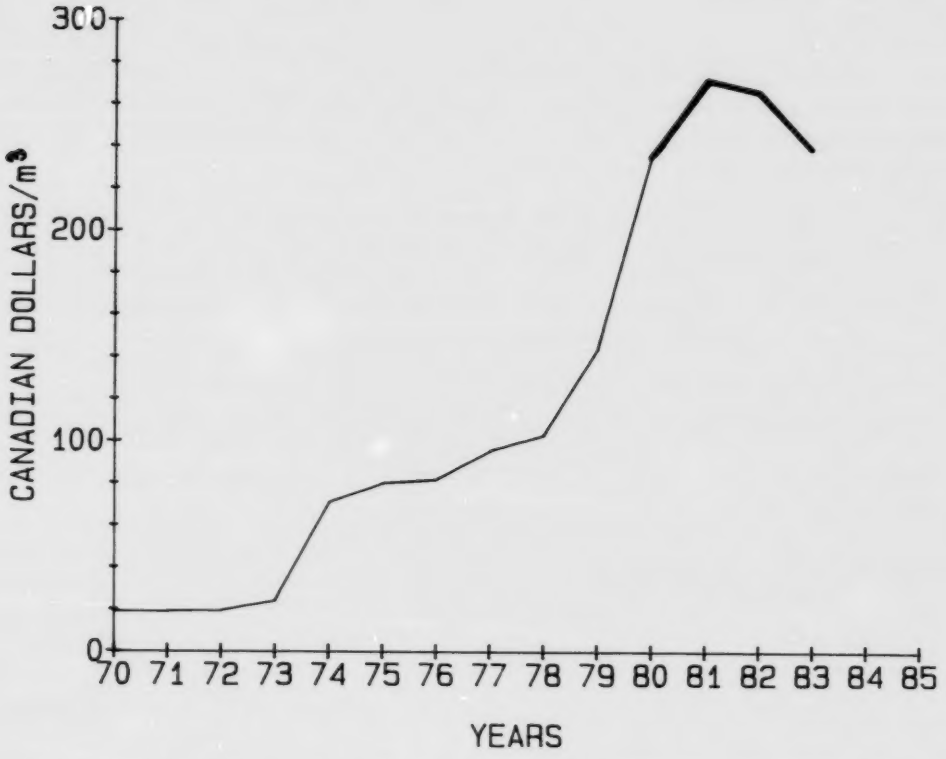


Figure 13. Averaged cost of imported crude oil in Montreal.

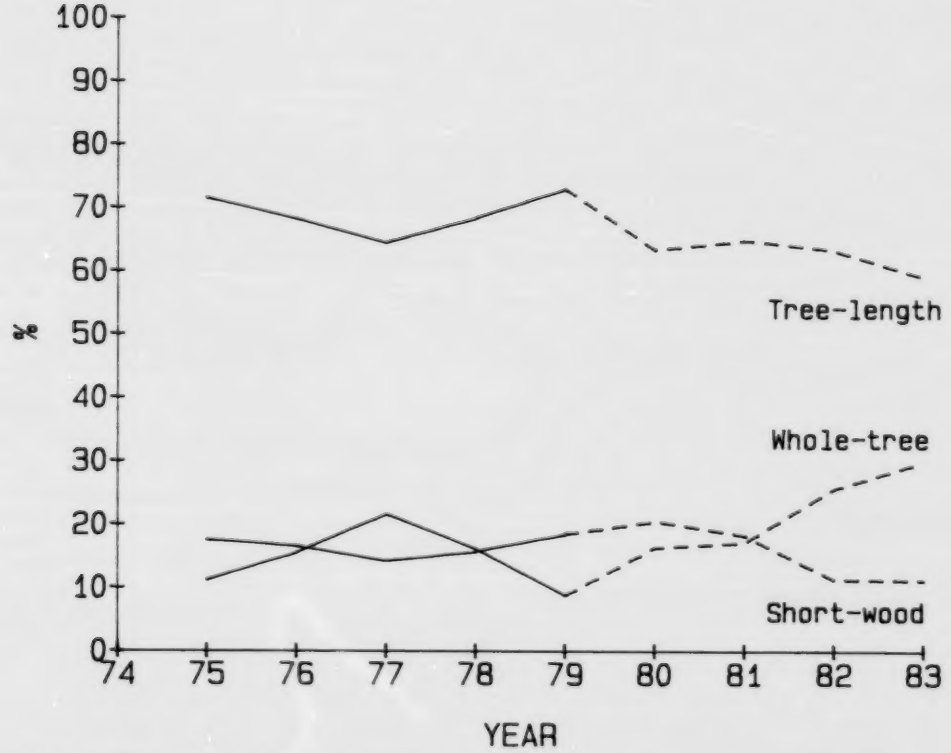


Figure 14. Percentage of total annual roundwood production in Canada for each harvesting system (C.P.P.A. 1984).

Influenced by this important change in the overall situation, noted in 1981, and the results of the RECUFOR evaluation, the FERIC programme on recovery of forest logging residues was oriented towards the recovery of residues piled at roadsides after delimbing operations.

As early as 1981, plans for a new prototype machine were developed, borrowing two important principles from the original RECUFOR idea:

1. The RECUFOR's collecting rotor was to be used for the primary reduction of residues; this rotor would be fed vertically by a sliding-boom grapple;

2. A regular hammer mill would perform the secondary reduction of residues.

This prototype, called LRP (Logging Residue Processor) was built during the 1983-84 year, and a preliminary assessment was carried out in 1984. The next section further details the LRP's development.

III. LRP (Logging Residue Processor)

A. Generalities

For each tonne of roundwood harvested, approximately one-half tonne of branches, tops foliage and trunks are left by the sides of roads. The importance of this quantity of residues is reflected in the fact that more than 300 roadside delimbers are actually in operation in Canada. This considerable energy potential is concentrated at the roadside where easy access is provided. Furthermore, the utilization of this mass of residues near the roads could liberate productive forest areas that would otherwise remain covered, and would also reduce fire hazards.

By 1981, many organizations had shown interests in recovering roadside residues for energy purposes. Several approaches to this problematical issue were undertaken and have led to different experimental prototypes, some of them reaching a commercial level. Therefore to insure any success in developing a new prototype (LRP), it was imperative to take into account the physical characteristics of the target residues, and to aim at high productivity criteria.

Within the ENFOR/FERIC framework, it was decided in 1983 to build the LRP prototype according to the plans submitted by LDC. This stage ended in 1984, when a series of preliminary tests were performed. The LRP's development, construction and tests were under LDC's (Logging Development Corporation) responsability while FERIC's special project division supervised the different stages of the project.

B. Prototype Description

The LRP illustrated in Figures 14 and 15 is a self-propelled, wheeled machine that can travel on logging roads. With a sliding boom and a grapple, it grasps delimber residues to deposit them in the shearing rotor. From the latter, sheared residues are fed into a conventional hammer mill and are then blown through a pipe to a truck bin. The main components of the LRP are briefly described in the following paragraphs.

1. Frame

Several parts of the RECUFOR were reused for the construction of the LRP. This reduced building and assembly costs considerably. The frame of the Clark 880 conventional skidder used on the RECUFOR was converted to carry the LRP components.

2. Shearing rotor

The RECUFOR's collecting rotor (hereafter called the shearing rotor) was also adapted to the LRP, requiring only small modifications. The vertical feeding principle of the rotor allows the processing of randomly-oriented residues, even when fed to maximum capacity, the shearing rotor supplies residues to the hammer mill at a constant rate.

Figure 15. The Logging Residue Processor (LRP).

3. Hammer mill

A Jeffrey 45WB hammer mill was mounted on the LRP. The use of a hammer mill permits a final reduction of the infeed material. The homogeneity of the material produced should ease its handling, drying and combustion. Moreover, a hammer mill is almost contaminant resistant, relative to a chipper.

4. Horizontal blower

A horizontal blower, to which a discharge pipe is connected, delivers residues from the hammer mill to a truck. Even though the pipe has a 45° elbow, there is no choking or build-up either in the blower housing or in the pipe. Rated power of blower is 37 kW.

5. Sliding boom loader

The LRP has a sliding boom equipped with a grapple. Its 18.3 m (60 foot) range is compatible with that of most conventional roadside delimbers. Grapple capacity is approximately 500 kg. Boom and cab are turret-mounted.

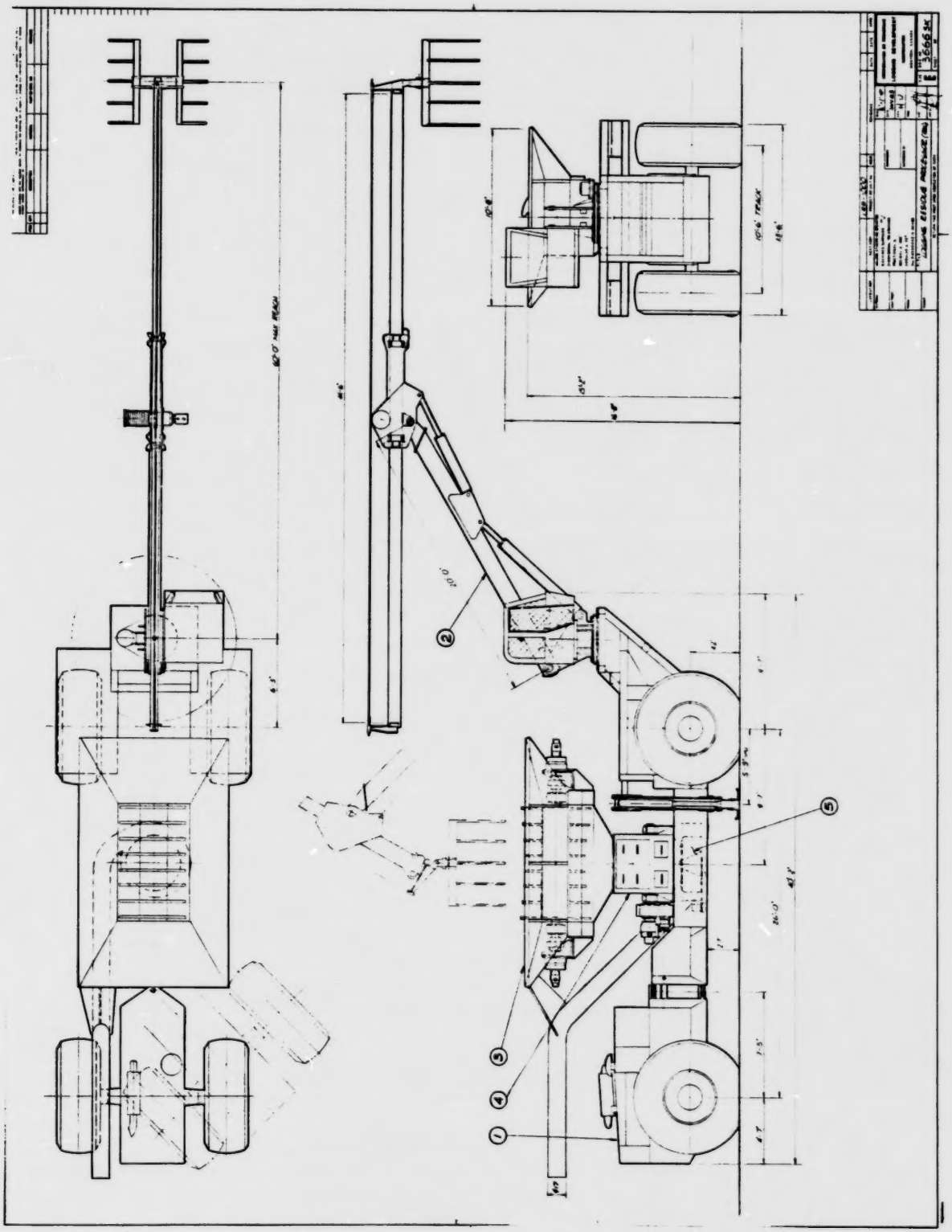


Figure 16. LRP prototype design.

C. Preliminary Evaluation of LRP

1. Objectives

A short series of tests was conducted soon after completion of the LRP final assembly in order, first, to ensure all parts were functioning well, and second, to measure a few production parameters. The reader is however cautioned that test results are preliminary and will be used for the planning of a more complete evaluation of the LRP. They should not be applied in another context.

The objectives of the tests were:

1. To measure processing times of weighed grapple loads of residues.

2. To establish feeding cycle times from the two principal positions--from the front and from one side.

3. To estimate the productivity potential of the machine.

4. To establish the maximum throwing distance of the modified blower.

5. To collect a significant quantity of processed residues and establish their density and size distribution.

2. Test conditions

The tests were conducted in the backyard of a plant, where residues were piled up to a height of six feet and laid out in rows. Residues consisted of freshly cut small hemlock, spruce, cedar and some aspen trees. Residue diameter never exceeded 13 cm.

Duration of tests was 2.5 days. Surrounding temperature was below -12°C the first day and above +3°C the next two days. Only eleven grapple loads were documented. Each bundle processed was first strapped and weighed on a crane hook scale. The bundle was then unstrapped, grappled by the booming system, positioned over the shearing rotor and then dropped into its knives. Processing time started when the grapple dropped its charge and stopped at the cessation of the principal flow of particles out of the discharge pipe.

3. Test results

Table 9 gives processing times for grapple loads studied. Processing rates, based on a full 60 minutes, ranged from a low of 9 tonnes/PMH where the rotor showed insufficient power to handle large grapple loads, to 40 tonnes/PMH with moderate grapple loads and sub-zero temperature conditions.

Table 10 presents the breakdown of the average feeding cycle time measured in the tests, totalling 1.07 min/cycle. With an average load weight of 400 kg, processing rate was established at 22.5 tonnes/PMH. The blower could throw processed particles from the pipe exit to a distance ranging from 9 to 15 m. Particle density measured by filling a 1.5 m^3 box placed at the exit of pipe was found to be 367 kg/m^3. Moisture content, bulk density, size distribution and heating value of particles were analyzed by Forintek (Ottawa) with results presented in Appendice III.

Table 9. Processing times and reduction rates of grapple loads.

Grapple load number	Load weight (kg)	Processing time (min)	Reduction rate (tonnes/PMH)
Series "A" (dry snow, temp. = 12°C)			
1	341	0.52	39.6
2	327	0.75	26.2
3	418	1.00	25.1
4	227	0.67	20.4
mean	328	0.76	25.9
Series "B" (wet snow, temp. = +3°C)			
5	386	0.57	40.9
6	364	1.62	13.5
7	369	1.93	11.5
8	409	1.72	14.3
mean	380	1.47	15.5
Series "C" (wet snow, temp. = +3°C)			
9	591	3.50[1]	10.1
10	523	2.75[1]	11.4
11	591	3.90[2]	9.1
mean	568	3.41	10.0

[1] includes regrip
[2] two stage drop

Table 10. Processing times and reduction rates of grapple loads.

Time elements	Description	Feeding - Average time measured (min/load)
Loading	Raise, retract, slew boom grapple and dump load	0.56
Return	Slew, extend and lower grapple	0.26
Search and grip	(estimated)	0.25
	Total	1.07

4. Discussion

Reduction rates achieved varied from 9 t/PMH to 40 t/PMH. The lowest rates are found in the series C, where the average load weight (568 kg) exceeded grapple rated capacity (500 kg). However, the longer reduction times of loads of series "C" are probably explained by a lack of power transmitted to the shearing rotor, pointing out that the average load weight was over the optimal load for the rotor capacity.

Following these preliminary tests, it is reasonable to estimate a processing time of 1.00 min/load with an average load weight of 410 kg for a commercial unit. Reduction rate would therefore amount to 24 tonnes/PMH, or 20 tonnes/SMH with an utilization ratio of 80%*.

The ambient temperature during operations could influence reduction rates. In frozen conditions, residues are more brittle and would therefore be easier to comminute, increasing the reduction rate. The opposite could also apply to unfrozen conditions.

Actual feeding cycle time averaged 1.07 min/cycle (or 56 loads/PMH) with an average load weight of 400 kg. Feeding rate was 22 tonnes/PMH or 18 tonnes/SMH (utilization ratio of 80%). In order to reach a minimum feeding rate of 20 tonnes/SMH, feeding cycle time would have to be brought down to 0.96 min/cycle (i.e. a minimum of 63 loads/PMH).

A systematic productivity study would be necessary at this stage to better assess the current productivity level of the LRP and to identify clearly the necessary modifications needed to improve its prototype status. The very short productivity study undertaken can, in no means, be substituted for a real short or long term study usually carried out for such a prototype. However it did indicate that a productivity level of 20 tonnes/SMH would be possible.

* Utilization ratio = $\frac{\text{Productive Machine Hours (PMH in Shift)}}{\text{Schedule Machine Hours (SMH)}} \times 100\%$

CONCLUSIONS

Priorities set for the recovery of logging residues have been substantially modified in the past few years. During the implementation phase of the ENFOR Program by the Canadian Forestry Service, several conditions favoured the recovery of residues left on cutovers. In the following period, i.e. the end of the 1970's, many changes were noted in the overall context (energy, forest, logging...) surrounding the use of forest biomass. These changes altered the orientation of FERIC's mandate, switching interest from the recovery of biomass left on cutovers to the use of biomass left at roadside after full tree delimbing operations.

Under current conditions, there are many disadvantages to recovering the residues left on logging sites, therefore a research and development program in this direction is no longer timely. Residues left on logging sites are the most expensive type of forest biomass to recover. Their economic use can only be justified in a particular energy context, where the demand for energy sources other than conventional is high. This last situation appeared possitive at the beginning of the ENFOR Program but the energy predictions made at that time did not resemble actual subsequent trends; the predicted shortage of petroleum did not take place, and world consumption dropped slightly, thereby causing the international price to decrease. Moreover, the market penetration of another important energy source, natural gas, effectively reduced the demand for energy from biomass. These new elements forced a change in the approach for the harvest of forest biomass.

The experience gained through the RECUFOR project proved positive on many accounts. Although the period of development of the RECUFOR has been very short, because of the changes mentioned in the previous paragraph, the experience and technology acquired with that prototype were of valuable use for the construction of the second prototype, the LRP.

In the present energy climate, technological developments aiming at the recovery of residues at roadside for energy purposes should eventually meet the needs of the fiber users. The construction of the LRP prototype is a step in this direction. Preliminary tests, carried out in autumn '84, indicate that potentially, the LRP could be economically viable, in which case it would become an attractive alternative to slash burning. However at this stage of development, a more exhaustive evaluation of the prototype is necessary to better assess its productivity levels in different working conditions. The review of technical difficulties arising in this kind of study is suggested, to better evaluate the future potential of the LRP.

BIBLIOGRAPHY

Canadian Pulp and Paper Association. 1984. Logging operations reports summaries, 1982 or 1982-83. C.P.P.A., Woodlands Section, Montreal. 24 p.

Cheremisinoff, Nicola P. 1980. Wood for energy production. Energy technology series Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers. 152 pp.

F.R.U.L. 1981. Inventory of forest biomass left after logging. ENFOR Project P-28, Special Report N° RS-13. FERIC, 143 Place Frontenac, Pointe-Claire (Quebec) H9R 4Z7. 172 p.

Kryla, J.-M. 1984. Determination of available heat of combustion data for Canadian woody species. ENFOR Project P-256. Canadian Forestry Service, Ottawa. 89 pp.

Mellgren, P.G. 1980. Terrain classification for Canadian forestry. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, W.S.I. 2840. 13 p.

Ministère de l'Energie et des Ressources. 1984. Les statistiques de l'energie au Quebec, 1983. Direction des communications du M.E.R. 80 pp.

Tillman, D.V.; A.J. Rossi; and W.D. Kotto. 1981. Wood combustion principles, processes and economics. Academic Press. 208 pp.

APPENDIX I

RECUFOR SPECIFICATIONS

Overall length	12.98 m	42' 7"
Maximum height	4.09 m	13' 5"
Maximum width	4.01 m	13' 2"
Collecting rotor width	1.83 m	6' 0"
Rotor diameter (including blades)	1.83 m	6' 0"
Total weight	37 000 kg	83 000 lbs
Engine capacity (from Clark 880 engine)	240 kW	320 hp
Bin volumetric capacity	43 m^3	1410 ft^3
Rotor speed	16 rpm	
Theoretical travelling speed while operating...	2.4 km/hour	

APPENDIX II

LRP SPECIFICATIONS

Overall length	12.34 m
Maximum width	4.11 m
Maximum height	5.08 m
Sliding boom reach	18.28 m
Grapple capacity	500 kg
Total weight	36 000 kg
Engine capacity	240 kW

APPENDIX III

DEFINITION OF TIME ELEMENTS

Travel Empty Road

Starts with movement away from unloading site after unloading and ends when machine leaves the road to enter cutover.

Travel Empty Cutover

Begins as the machine leaves the road to enter cutover and ends when rotor begins to turn for collection of residues.

Collection

Begins when the collecting rotor starts to turn and ends after a full load has been collected and the rotor stops. Collection time may be interrupted by "Move Between Strips".

Move Between Strips

Begins as the machine leaves a strip after completing its collection and ends when collection resumes in the next strip.

Travel Loaded Cutover

Begins when rotor stops after collection is completed and ends when machine leaves cutover.

Travel Loaded Road

Begins as machine reaches road and ends when the machine starts to manoeuver prior to unloading at the landing.

Manoeuver

Time spent orienting the machine for unloading. It starts when the machine reaches the unloading site and ends when machine movement stops prior to unloading.

Unloading

Starts when machine movement stops prior to unloading and ends when the machine starts moving again for travel empty.

APPENDIX IV

ANALYSES OF HOGGED SLASH (FORINTEK)

A 13 kg sample of hogged softwood slash was delivered by Mr. D. Hamilton (Logging Development Corporation) December 12, 1984.

1. Moisture Content

Three sub-samples were taken from the material as-received and oven-dried at 105°C. The moisture contents, wet basis, were:

Sample #1 - 45.7%
Sample #2 - 49.1%
Sample #3 - 50.6%

for an average MC of 48.5%

2. Bulk Density

Bulk density of the material as-received was determined using a 0.0283 m^3 (1 ft^3) plywood cubic box. Determinations were made for loose gravity packed, shaken, and lightly compacted (about 10 kPa [2.5 psi]).

	Green Weight/Green Volume		Dry Weight/Green Volume	
	kg/m^3	lb/ft^3	kg/m^3	lb/ft^3
gravity packed	294	18.3	151	9.4
shaken	414	25.9	213	13.3
lightly compacted	553	34.5	285	17.8

3. Size Distribution

The material was air-dried in the lab at room temperature with forced air circulation to promote rapid drying and prevent biological degradation. It was then passed through a KASON model K.18.1.CS seperator fitted with 1M (1-inch), 2M (1/2-inch), 4M (1/4-inch) and 20M (1/20-inch) woven wire screens.

Mesh		Weight (air-dry g)	Percent
1M	(1-inch plus)	1908.3	29.0
2M	(1/2 - 1 inch)	2191.2	33.3
4M	(1/4 - 1/2 inch)	1451.7	22.0
20M	(1/20 - 1/4 inch)	949.1	14.4
fines	(1/20 inch minus)	85.0	1.3
	Total	6585.3	100

4. Heating Value and Ash Content

From each of the screened materials (5 size groups) a 1/10 sample by weight was collected and recombined, i.e. a total of 659 g. This was passed through a N°1 Wiley mill fitted with a screen having 6.4 mm (1/4-inch) holes. The coarsely ground sample was thoroughly mixed and a 50 g sub-sample removed for fine grinding using a screen with 0.5 mm (0.02-inch) holes. The small samples for HHV and ash content analyses were taken from this material. Heating value was determined in a Parr oxygen-bomb calorimeter on the air-dry sample (5.7% MC) and corrected by calculation to a dry wood basis. Ash content was determined by heating in a muffle furnace at 600°C.

Higher Heating Value:

as tested 19.36 MJ/kg (8330 BTU/lb)
corrected to dry 20.54 MJ/kg (8834 BTU/lb)

Ash Content: (% of dry wood weight) 2.93

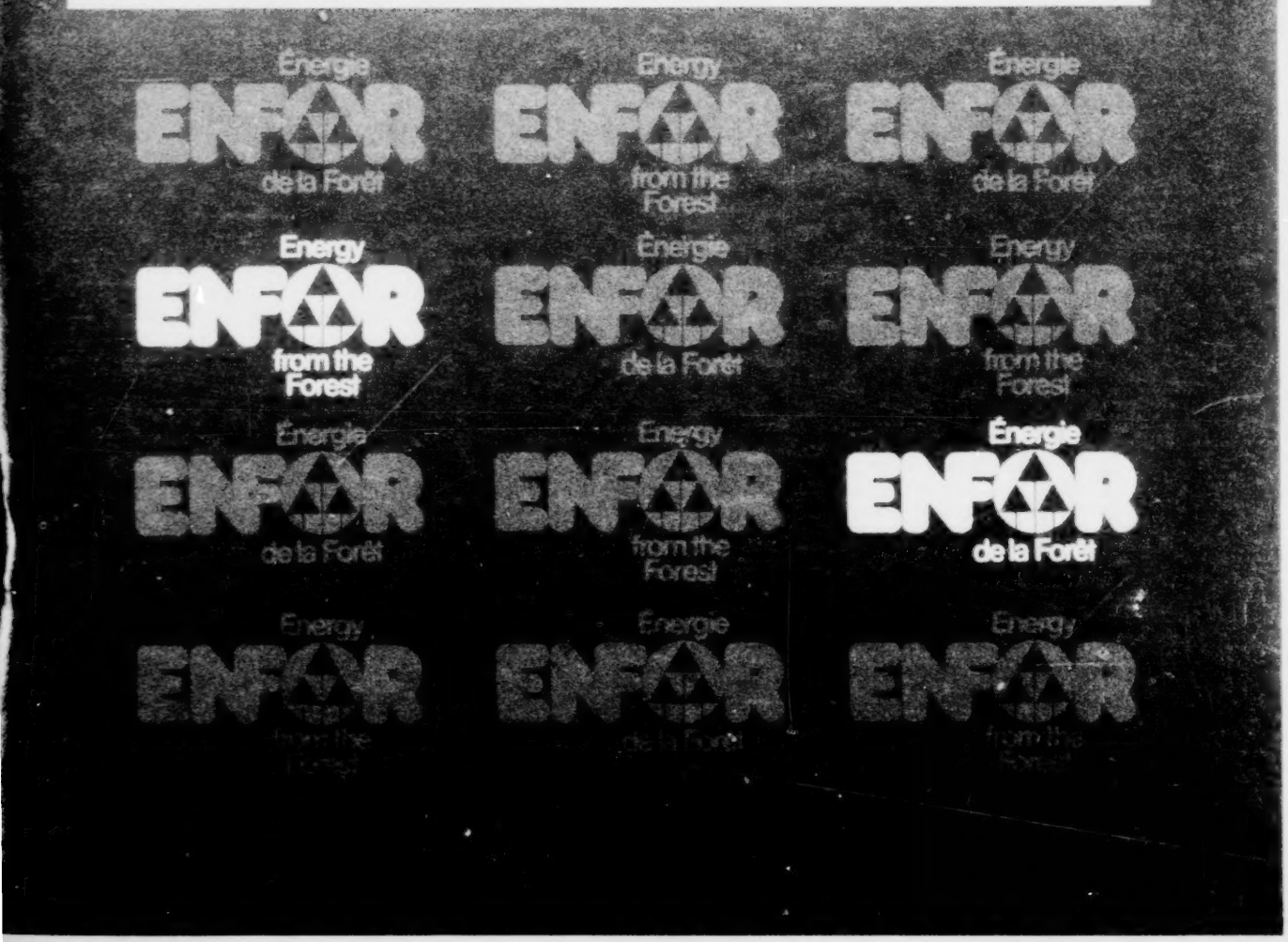
FERIC

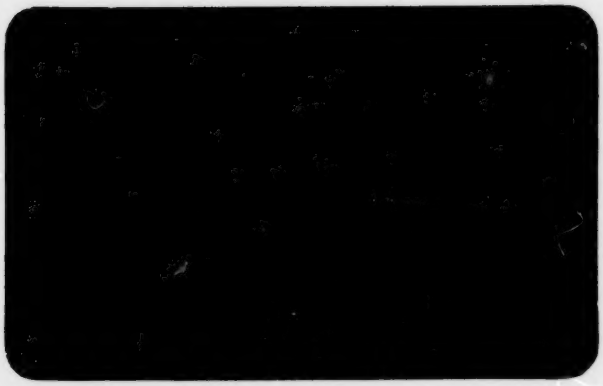
FOREST ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE OF CANADA
INSTITUT CANADIEN DE RECHERCHES EN GÉNIE FORESTIER

DÉVELOPPEMENT ET MISE À L'ESSAI DES PROTOTYPES DU RECUFOR ET DU LRP EN VUE DE LA RÉCUPÉRATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE

par

André Du Sault, ing.f.





DÉVELOPPEMENT ET MISE À L'ESSAI DES PROTOTYPES DU RECUFOR ET DU LRP EN VUE DE LA RÉCUPÉRATION DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE

par

André Du Sault, ing.f.

Rapport Spécial N° RS-36

Projet ENFOR P-210

Avril 1986

© Copyright 1986, Institut Canadien de recherches en génie forestier

ISSN 0706-8468

PRÉFACE

Le présent rapport constitue un compte-rendu du développement de deux machines prototypes (RECUFOR et LRP), destinées à la récupération de la biomasse forestière sur parterre de coupe et en bordure de route. Ce projet conjoint FERIC/ENFOR était sous la responsabilité de la Division des projets spéciaux de FERIC. La firme Corporation de Recherche - Logging Development de Montréal a reçu de FERIC le mandat de réaliser la conception, la construction et la mise à l'essai des deux prototypes.

Le rôle de l'auteur s'est limité à rédiger ce rapport à l'aide des documents mis à sa disposition.

Ce rapport est disponible de:

Institut Canadien de Recherches en
Génie Forestier
143, Place Frontenac
Pointe Claire, Québec
H9R 4Z7

Secrétariat ENFOR
Service Canadien des Forêts
Ottawa, Ontario
K1A 0E7

This report is also available in English

TABLE DES MATIÈRES

	Page
PRÉFACE	i
RÉSUMÉ	iii
I. INTRODUCTION ET MISE EN SITUATION	1
II. LE RECUFOR	4
A. Maquette originale	4
B. Description du prototype du RECUFOR	7
C. Évaluation du RECUFOR	11
D. Changement de contexte	21
III. LE LRP	24
A. Généralités	24
B. Description du prototype	24
C. Évaluation préliminaire du LRP	27
CONCLUSIONS	30
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXE I - FICHE TECHNIQUE DU RECUFOR	32
ANNEXE II - FICHE TECHNIQUE DU LRP	33
ANNEXE III - DÉFINITION DES TEMPS ÉLÉMENTAIRES	34
ANNEXE IV - ANALYSE DES RÉSIDUS PRODUITS PAR LE LRP	35

RÉSUMÉ

L'intérêt accru dans l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables, vers la fin des années 1970, a mis en relief le potentiel énergétique de la biomasse forestière. Dans le cadre d'une entente FERIC/ENFOR, FERIC s'est vu confier la responsabilité, entre autres, de développer une technologie visant la récupération des résidus de coupe et leur transformation sous une forme compatible avec les systèmes actuels de conversion en énergie.

Dans une première étape, le projet a donné lieu en 1982 à la construction du prototype du RECUFOR (récupératrice porteuse de fragments). Le RECUFOR était capable d'effectuer les opérations suivantes:

- pénétrer sur le parterre de coupe pour y récupérer à l'aide d'un tambour de ramassage les résidus laissés sur le sol, tels les houppiers et les branches;

- réduire ce matériel à des dimensions favorisant une manutention en vrac;

- accumuler, transporter et décharger les résidus en bordure de route.

Dans l'ensemble, la performance du prototype lors des essais a montré que le concept de base était techniquement réalisable, mais que les coûts de récupération de cette biomasse étaient trop élevés pour justifier le développement commercial d'une telle machine.

Un deuxième prototype du nom de LRP (Logging Residue Processor), ou fragmenteuse-broyeuse de résidus, fut construit pour répondre aux changements survenus durant la période 1980-82 dans les besoins énergétiques à l'échelle mondiale, ainsi que dans les techniques d'exploitation pratiquées au Canada. Le LRP est une machine auto-propulsée, qui se déplace sur les chemins forestiers pour récupérer les résidus laissés en bordure de route, à la suite d'opérations d'ébranchage d'arbres entiers. Elle comporte un double système de transformation (fragmentation par tranchage et broyage), avec dispositifs de manutention avant et après traitement.

Les essais préliminaires du LRP entrepris en 1984 ont indiqué qu'il serait possible d'atteindre une productivité de 20 t humides/HMPv, si certaines modifications étaient apportées au prototype actuel.

I. INTRODUCTION ET MISE EN SITUATION

La situation énergétique qui prévalait à l'échelle mondiale dans les années '70 a incité le gouvernement canadien à mettre sur pied des programmes favorisant l'utilisation des sources renouvelables d'énergie, ainsi qu'à développer la technologie nécessaire. Les inventaires des résidus d'exploitation laissés en forêt, que ce soit sur le parterre de coupe ou en bordure de route, démontraient que ces résidus forestiers constituaient un potentiel énergétique prometteur.

La biomasse forestière comprend les résidus d'usine (bran de scie, écorce, liqueurs...) et les résidus d'exploitation laissés en forêt (branches, houppiers...). Les résidus d'exploitation offrent généralement certains désavantages par rapport aux résidus d'usine: ils sont ordinairement moins accessibles et présentent souvent des degrés d'impureté plus élevés. De plus, l'hétérogénéité de ces résidus cause des problèmes particuliers de transformation. Par conséquent ils constituent généralement une source de biomasse énergétique plus coûteuse. Cependant devant la montée considérable des prix mondiaux du pétrole (figure 1) dans les années 1970 et la disponibilité relativement limitée des sources d'hydrocarbures au Canada, les résidus d'exploitation sont alors apparus comme une source économique de biomasse d'où l'on pouvait tirer de l'énergie de remplacement.

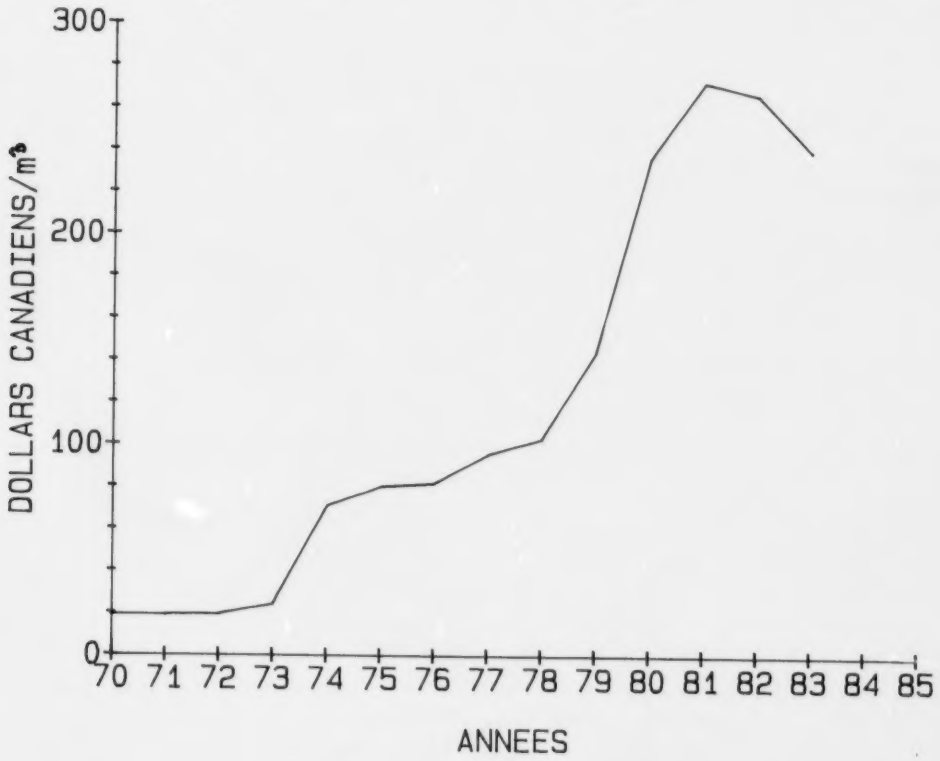


Figure 1. Prix moyen international du pétrole brut livré à Montréal.

La localisation et le type des résidus d'exploitation sont déterminés en grande partie par le système d'exploitation* en usage. La figure 2 présente pour les trois systèmes usuels d'exploitation, leur pourcentage respectif de la production totale de bois ronds. De 1975 à 1980, plus de 80% de la production totale annuelle fut réalisée selon les systèmes de bois courts et de troncs entiers. Étant donné que ces deux systèmes laissent considérablement plus de résidus sur le parterre de coupe que le système d'arbres entiers (voir tableau 1), la priorité a été accordée au développement d'une technologie permettant de récupérer la biomasse ligneuse générée par la pratique de ces deux premiers systèmes.

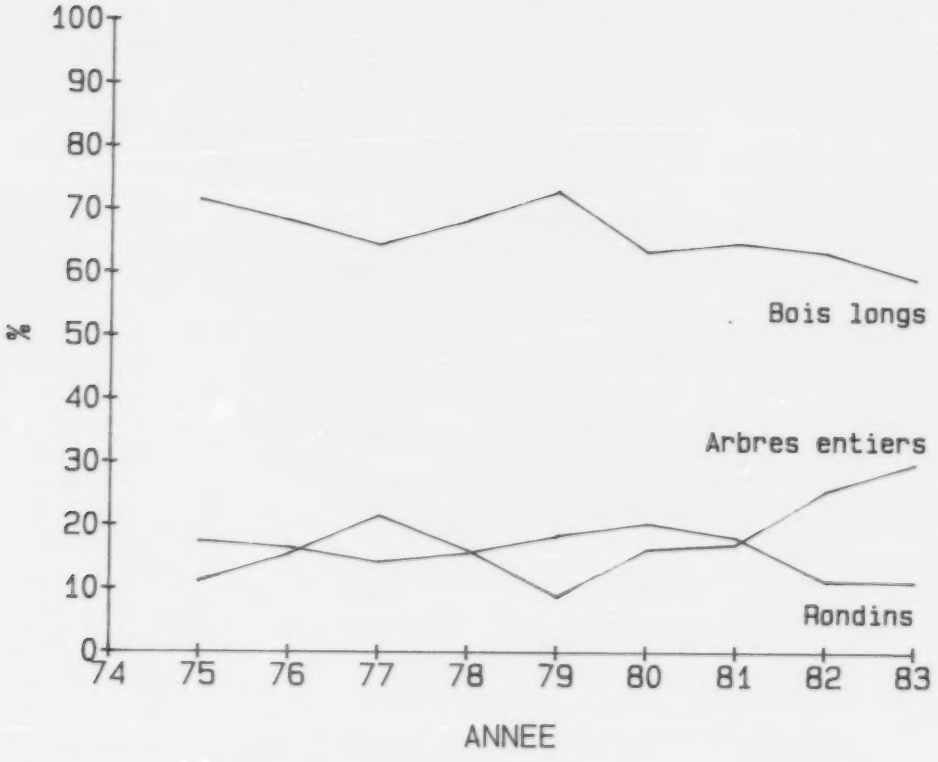


Figure 2. Pourcentage de la production totale annuelle de bois ronds au Canada pour chacune des méthodes d'exploitation (ACPPP, 1984).

* Les systèmes d'exploitation sont définis suivant le nombre d'opérations effectuées à la souche. Dans le système par bois courts, l'arbre est abattu, ébranché et tronçonné en longueurs prédéterminées à la souche. Les tronçons sont ensuite transportés jusqu'en bordure de route. Dans le système par troncs entiers, l'arbre est abattu, ébranché, étêté puis transporté jusqu'en bordure de route. Dans le système par arbres entiers, l'arbre est abattu et transporté entier jusqu'en bordure de route.

Tableau 1. Poids anhydre des résidus laissés sur le parterre de coupe (t/ha), par méthode d'exploitation, sur une station d'épinette noire (FRUL, 1981)

méthode d'exploitation	houppiers	branches	bois vert	bois sec	total des résidus	proportion*
troncs entiers	26,2	11,6	6,1	9,9	53,8	2,6
bois courts	11,1	22,0	21,8	15,8	70,7	3,4
arbres entiers	1,2	3,2	7,9	8,4	20,7	1,0

* proportion des résidus par rapport à la méthode par arbres entiers.

En 1979, FERIC recevait, dans le cadre du programme ENFOR, le mandat d'entreprendre un programme de recherches et de développement visant la récupération et la transformation de la biomasse forestière à des fins énergétiques. Plus spécifiquement, les travaux de FERIC devaient porter sur le développement et la construction d'une machine expérimentale pouvant effectuer les tâches suivantes:

- récupérer à l'aide d'un tambour de ramassage les résidus laissés sur le parterre de coupe, tels les houppiers et les branches;
- réduire ce matériel à des dimensions favorisant une manutention en vrac;
- accumuler, transporter et décharger les résidus en bordure de route;
- demander une dépense minimale d'énergie.

En mars 1980, la maquette d'une machine pouvant récupérer les résidus de coupe était présentée à un comité consultatif (ENFOR) et il fut décidé de soumettre aux essais la composante principale du concept (tambour avec dents), durant l'été 1980. Les essais furent jugés positifs, établissant la viabilité technique du concept. Par la suite, FERIC entreprit la préparation de plans et devis pour la construction d'un prototype expérimental. Cette phase fut complétée au printemps 1981 par la firme Corporation de Recherche - Logging Development de Montréal, dont les services furent aussi retenus pour superviser la fabrication du prototype. Ce dernier, appelé RECUFOR, fut mis à l'essai en forêt durant l'été 1982. La performance du prototype s'est révélée généralement conforme aux prévisions.

Cependant, déjà durant la période 1981-82 le contexte énergétique se modifiait (figure 1) tout autant que les tendances dans les méthodes d'exploitation (figure 2). L'attention se porta alors davantage vers la transformation et l'utilisation des résidus d'ébranchage en bordure de route. Comme le système d'exploitation par arbres entiers prenait alors de plus en plus d'importance au Canada, FERIC demanda à LDC de concevoir un nouveau prototype d'une machine auto-propulsée et auto-chargeuse, comportant un procédé de transformation en deux étapes. Le prototype expérimental LRP (Logging Residue Processor - fragmenteuse broyeuse de résidus) fut construit en 1983 et soumis à des essais préliminaires en 1984. Les résultats furent jugés très encourageants et une évaluation plus complète du prototype devrait avoir lieu dans un avenir prochain.

Le présent rapport décrit les résultats des différentes étapes du développement du RECUFOR, et dans une moindre mesure celui du LRP, durant la période 1979-1984.

II. LE RECUFOR

A - Maquette originale

1. Généralités

M. Armand Morin, président de "Les Broyeurs A.M." de Val d'Or (Québec), soumettait à FERIC en 1980 la maquette (illustrée à la figure 3) d'une machine pouvant récupérer les résidus sur parterre de coupe, les fragmenter et les transporter jusqu'en bordure de route. Le principe comportait deux tambours installés bout à bout à l'avant de la machine et équipé de longues dents incurvées, destinées à ramasser les résidus. Ceux-ci passaient ensuite dans une déchiqueteuse située à l'arrière des tambours.

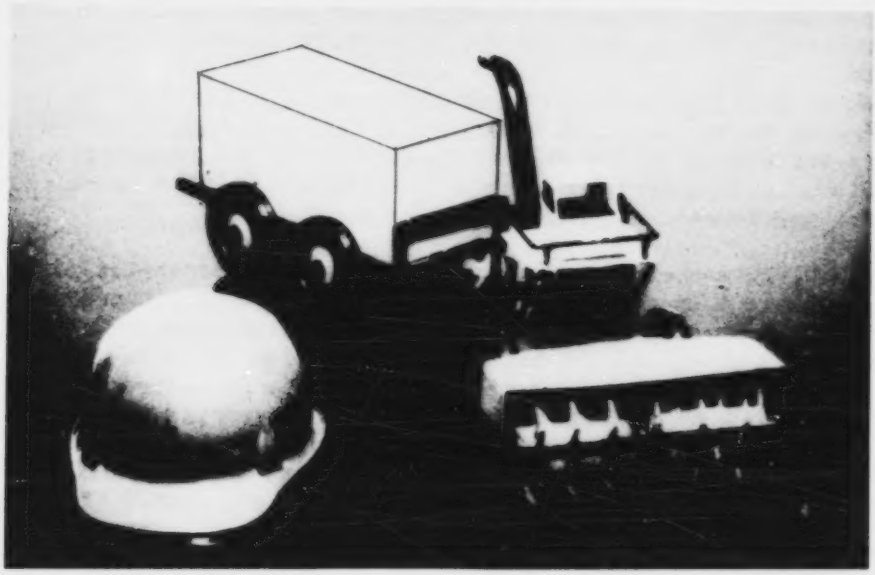


Figure 3. Maquette originale du RECUFOR.

Après la présentation de la maquette, il fut décidé de mettre à l'essai durant l'été la tête de ramassage, afin de vérifier la validité du principe.

2. Premiers essais du tambour de ramassage

La tête de ramassage fut construite par "Les Broyeurs A.M.", sous la direction technique de la firme Corporation de Recherche - Logging Development. L'unité consistait en un rotor actionné et équipé de quinze lames incurvées, distribuées en 3 rangées obliques sur son pourtour. Une série de couteaux fixes montés derrière le rotor coupe les résidus ramassés et entraînés par les lames en longeurs d'environ 30 cm. Aux fins d'essais, le tambour était monté à l'avant d'une chargeuse Hydro-Ax 400. Le tambour étant trop lourd pour la capacité de levage de la chargeuse, des roues de support furent rajoutées à chaque extrémité du tambour (figure 4).

Figure 4. Essais du tambour de ramassage à la jetée.

Le 27 août 1980, à Val d'Or (Québec), des représentants de l'industrie et d'ENFOR étaient témoins des premiers tests effectués avec le tambour de ramassage. Des résidus de coupe avait été répandus sur un terrain plat sablonneux, simulant ainsi grossièrement une aire de coupe. Ces résidus comprenaient des branches, houppiers, rondins..., d'essences résineuses et feuillues. Les résultats, jugés positifs, démontraient que le tambour équipé de lames incurvées était capable de ramasser ce type de résidus et de procéder à une première fragmentation. Avant tout développement ultérieur, l'étape suivante consistait à faire des essais avec le même tambour sur une aire de coupe réelle. La tête de ramassage fut transférée sur la lame avant d'un tracteur à chenilles Terex 82-50. L'utilisation du tracteur permettait de régler la hauteur du tambour selon les irrégularités du terrain et d'éviter les grosses souches rencontrées sur un parterre de coupe (figure 5).

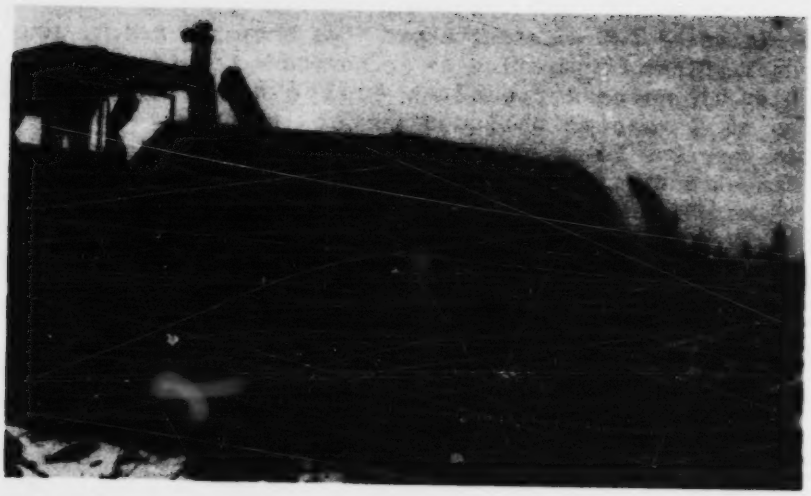


Figure 5. Essais du tambour de ramassage monté sur un tracteur à chenilles (sur l'aire de coupe).

Cette seconde série d'essais permit de tirer les conclusions suivantes:

1. Il était possible de recueillir les résidus d'exploitation d'une aire de coupe à l'aide d'un tambour équipé de lames incurvées avec une efficacité satisfaisante.

2. En raison de l'hétérogénéité et de l'orientation irrégulière des résidus de coupe, certains problèmes pouvaient se présenter dans l'acheminement de ces résidus du tambour à la benne.

3. La faible densité en vrac des résidus récupérés allait être un facteur important dans le développement des dispositifs de manutention et d'entreposage.

On décida de poursuivre le développement du RECUFOR. À cette fin, le projet ENFOR P-210 fut mis sur pied. Il prévoyait la construction d'un prototype expérimental et son évaluation lors d'essais sur le terrain. Ces essais devaient répondre aux principaux objectifs suivants:

1. Entreprendre une évaluation poussée du tambour de ramassage par des essais détaillés en forêt, tenant compte de conditions variées de terrain;

2. Évaluer la conception des principales composantes du RECUFOR et suggérer des correctifs à toute faiblesse constatée;

3. Déterminer si la rotation du tambour à la surface du sol était susceptible de faciliter les opérations de préparation de terrain et de reboisement.

De plus, il fut suggéré d'examiner d'autres moyens d'utiliser le principe du tambour horizontal de ramassage et de lui trouver d'autres applications pratiques.

B. Description du prototype du RECUFOR

1. Concept retenu

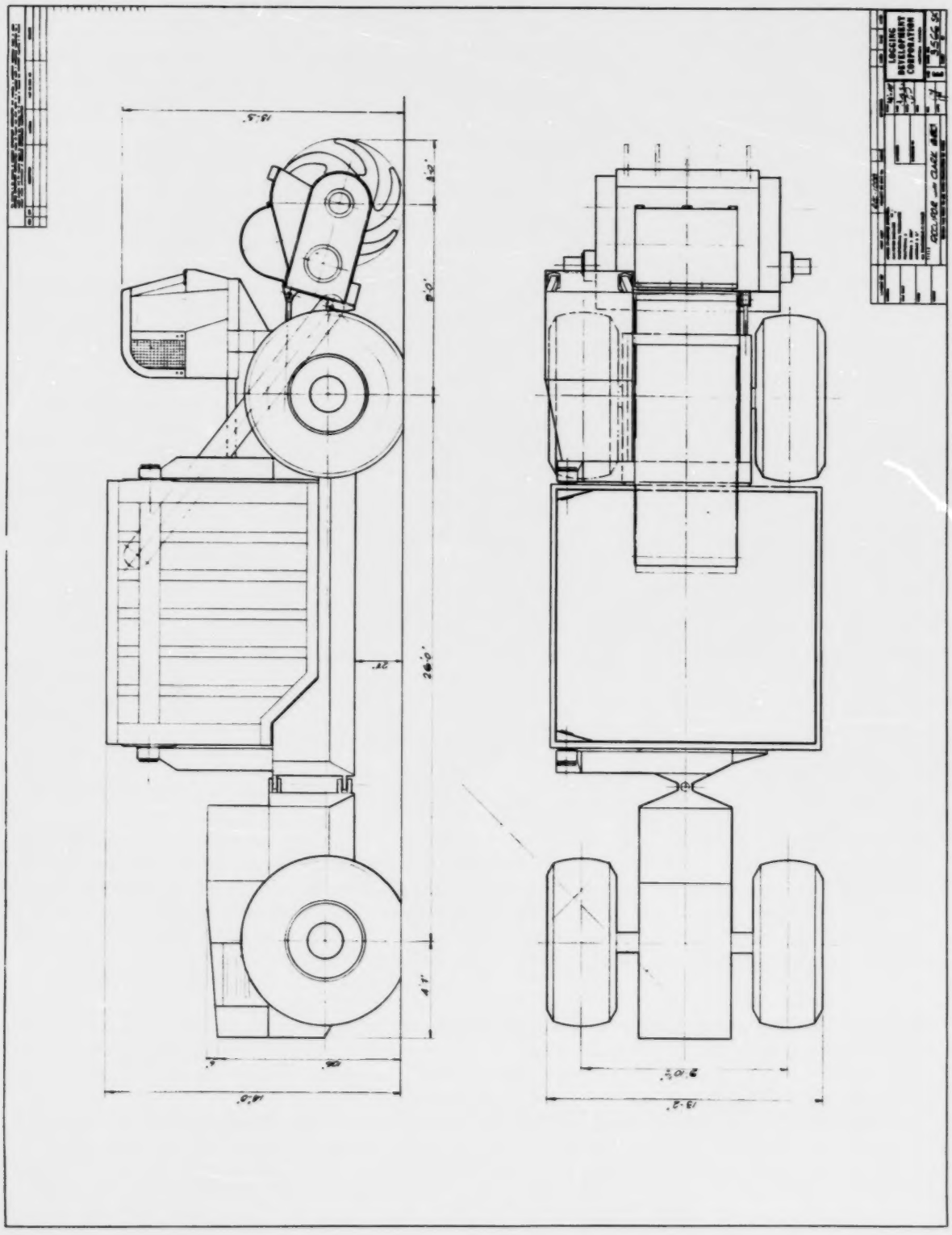
Le concept retenu diffère légèrement de la maquette originale. Il est caractérisé par le montage du tambour de ramassage et du convoyeur à l'avant, de la benne au centre et du moteur à l'arrière. Un débardeur à roues conventionnel (Clark 880) a été utilisé comme châssis automoteur du prototype. La benne est insérée au point d'articulation, et la cabine, le rotor ainsi que le convoyeur sont montés en porte-à-faux au-delà des roues avant (voir figures 6 et 7).

Figure 6. Vue latérale du RECUFOR.

Le principe de fonctionnement du RECUFOR est le suivant. Les résidus forestiers au sol sont ramassés par les lames incurvées et ramenés vers l'arrière où se trouve une série de couteaux fixes. Lorsque les lames arrivent au niveau de ces couteaux, les résidus sont coupés et broyés pour ensuite glisser sur un plan incliné. Des bras de poussée dégagent les couteaux, empêchant ainsi toute accumulation de résidus ligneux (figure 8). Après avoir descendu le long du plan incliné, les résidus sont repris par un convoyeur à courroie qui les achemine en montant vers la benne.

L'évaluation des concepts originaux, tels que proposés par M. Morin, révéla que certaines difficultés techniques risquaient de compliquer la construction du prototype entier, dans sa version originale. Des modifications furent apportées, dont les composantes seront mentionnées lors de la description des principales composantes du RECUFOR, dans les sections suivantes. Les composantes les plus critiques ont été construites en premier lieu et mises à l'essai en atelier afin d'assurer leur fonctionnement avant le montage final.

Figure 7. RECUFOR



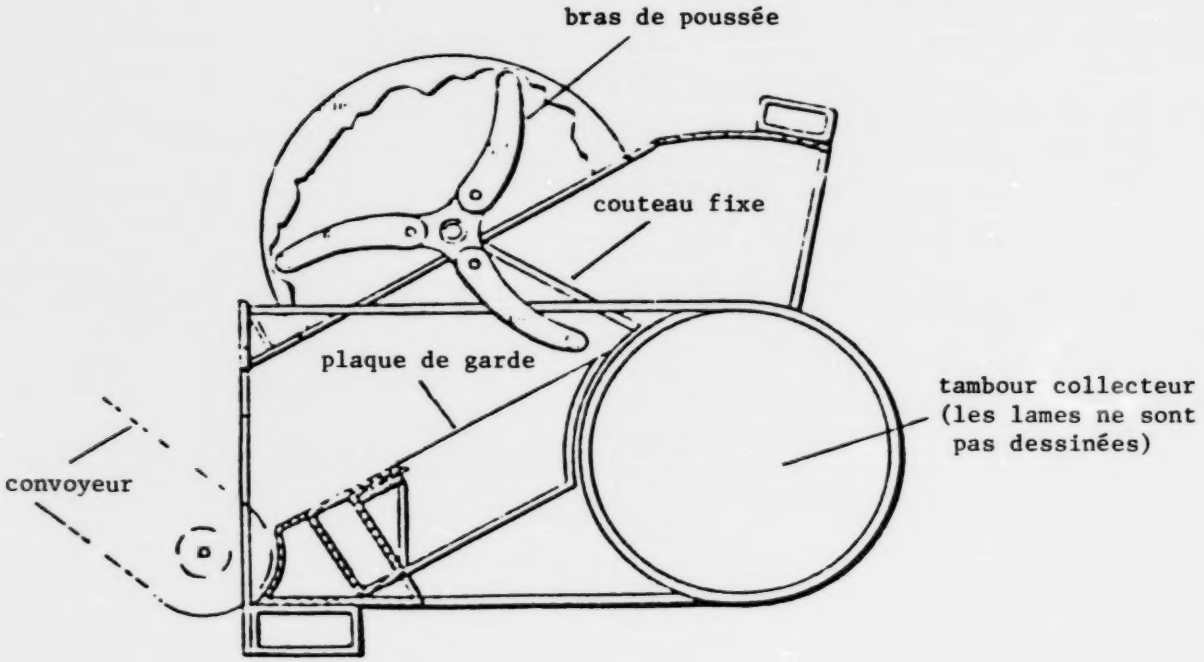


Figure 8. Détails du système de récupération et de transfert des résidus au convoyeur.

2. Tambour de ramassage

Pour des raisons économiques, le tambour de ramassage construit pour les premiers essais a été utilisé sur le RECUFOR. La pointe des lames fut biseautée et affûtée afin de faciliter le passage des lames dans les souches. La figure 9 présente les détails du tambour. Le modèle original ne possèdant qu'un seul entraînement à chaînes, un deuxième entraînement fut rajouté à l'autre extrémité du tambour.

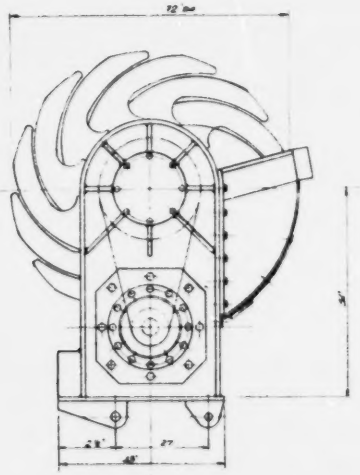


Figure 9. Tambour de ramassage.

Le transfert des résidus du tambour au convoyeur présenta des difficultés particulières. Lorsque les lames passaient à travers les fentes de la plaque de garde, il arrivait souvent que des résidus restent coincés entre la lame et la plaque de garde, bloquant ainsi le tambour. Les couteaux furent alors disposés au bord des fentes, chaque couteau étant jumelé à une lame et jouant le rôle d'un outil de contre-coupe. Les résidus avaient aussi tendance à s'accuumuler au niveau de la plaque de garde au lieu de glisser vers le bas du convoyeur. La seule poussée des lames sur les résidus était insuffisante. Afin de surmonter cette difficulté, plusieurs mécanismes furent essayés. Le système avec bras de poussée flexibles fut retenu comme le plus efficace (figure 9).

3. Fragmentation secondaire

Le concept original proposait une déchiqueteuse ou un broyeur afin de fractionner une deuxième fois les résidus ligneux en provenance du tambour de ramassage, mais ni l'un ni l'autre ne fut incorporé au RECUFOR. Ce second système de fragmentation aurait rendu le système de récupération et d'acheminement vers la benne très complexe, particulièrement du tambour à la déchiqueteuse, et aurait considérablement augmenté la demande de puissance globale. De plus cette décision éliminait le problème de la classification des copeaux lorsque les résidus sont alimentés dans la déchiqueteuse sans direction déterminée. Cependant, cela implique que les résidus ramassés par le RECUFOR devront vraisemblablement subir une autre fragmentation avant leur conversion en énergie, d'où une étape supplémentaire dans le processus de manutention.

4. Benne

La benne est une partie intégrante du RECUFOR, alors qu'originalement on avait proposé l'utilisation de conteneurs amovibles. Une fois chargé, le RECUFOR se déplace jusqu'en bordure de route où il bascule les résidus sur le côté et à une hauteur suffisante pour qu'ils puissent tomber dans un autre conteneur (figure 10). Cette disposition était satisfaisante pour un prototype.

5. Système de direction

On a choisi un système à châssis articulé, comme dans la maquette originale. Toutefois, le point d'articulation fut placé vers l'arrière du véhicule porteur plutôt qu'au centre, de façon à ce que le tambour de ramassage, le convoyeur et la benne fassent partie de la même section. Cette disposition simplifiait le passage des résidus du tambour à la benne, et permettait une meilleure distribution du poids de la machine. Une articulation centrale aurait demandé la construction d'un châssis entièrement nouveau, au lieu de l'utilisation d'un débardeur conventionnel comme châssis automoteur.

6. Transmission

Les essais préliminaires sur le site de construction ont montré que la première vitesse sur la transmission du débardeur était trop rapide pour servir de vitesse de récupération pour le RECUFOR. La transmission hydrostatique entraînant le tambour fut transférée au circuit principal (direction) et un circuit hydraulique auxiliaire fut ajouté pour commander le tambour de ramassage.

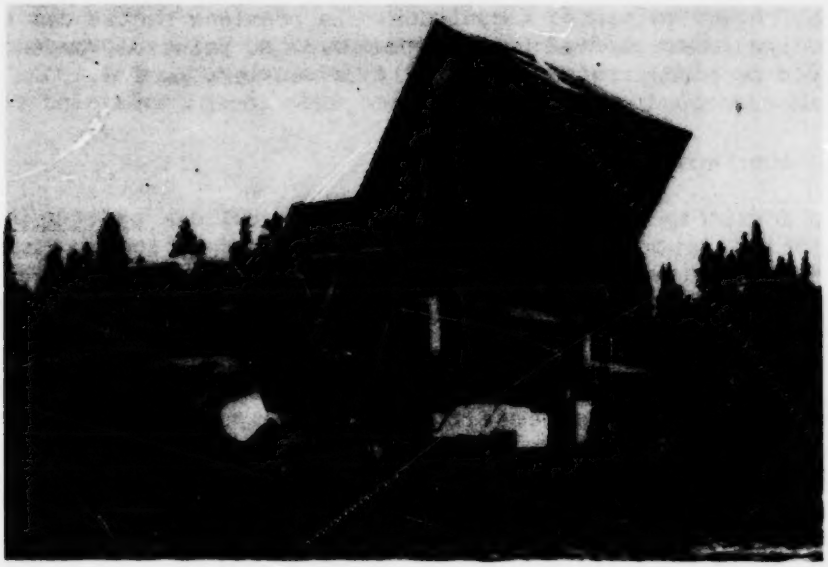


Figure 10. Déchargement sur le côté du RECUFOR

7. Poids

Le RECUFOR avait un poids total de 37 750 kg. Ce poids étant jugé excessif, il fut estimé que plusieurs mesures pourraient contribuer à le réduire:

1. Étant donné la faible densité en vrac des résidus, une modification dans la conception de la benne pourrait en réduire le poids.

2. La construction d'un châssis spécifiquement adapté aux fonctions et aux besoins du RECUFOR.

3. L'utilisation de transmissions hydrostatiques pour toutes les fonctions motrices.

Ainsi, même si on équipait le RECUFOR d'un moteur plus puissant, il serait possible de limiter le poids d'un modèle pré-commercial entre 29 000 à 30 000 kg.

C. Évaluation du RECUFOR

L'évaluation du RECUFOR a eu lieu durant les mois de juillet à septembre 1982. Les aires d'essais étaient situées sur les concessions forestières de la CIP Inc. (Division St-Maurice), près du camp forestier du Lac Elaine, à environ 200 km au nord de La Tuque (Québec).

Quand il est mis en oeuvre pour la première fois, un nouveau prototype est sujet à de fréquentes pannes mécaniques. La première partie des essais visait donc principalement à évaluer le prototype au point de vue technique. Une courte étude de productivité constituait la deuxième partie.

1. Évaluation technique sommaire

Durant les premières semaines d'essais, plus de 80% des problèmes techniques ont été reliés de près ou de loin au système hydraulique. Plusieurs fuites répétées de fluide hydraulique et des ruptures fréquentes de tuyaux flexibles se produisant toujours aux mêmes points de raccordement indiquaient que certaines parties du système hydraulique étaient inadéquates et demandaient une nouvelle conception. L'addition de soupapes de sureté et d'accumulateurs ne réussit pas à régler entièrement ces problèmes. Ce mauvais fonctionnement du système hydraulique empêchait d'autres composantes de donner leur plein rendement:

1. La puissance transmise au tambour de ramassage était insuffisante, et on notait des blocages fréquents du tambour;

2. La transmission hydrostatique n'arrivait pas à faire déplacer la machine aussi rapidement que prévu: la vitesse de déplacement mesurée du RECUFOR était de 0,6 km/heure alors que la vitesse estimée avait été de l'ordre de 1,6 km/heure.

Durant la même période les problèmes suivants furent aussi notés:

- une mauvaise visibilité ne permettait pas à l'opérateur de bien régler la hauteur du tambour de ramassage par rapport au niveau du sol. Ainsi, lorsque le tambour était trop élevé, seule la partie supérieure des déchets pouvait être ramassée. Par contre, lorsque le tambour était réglé trop bas, les lames incurvées ramassaient une partie du sol organique, contaminant ainsi les résidus ligneux. De plus les lames incurvées avaient tendance à arracher les souches et ces dernières bloquaient inévitablement le tambour au niveau des couteaux. Les pointes des lames furent biseautées et affûtées pour qu'elles puissent fendre les souches au lieu de les arracher.
- le tambour pouvait aussi être bloqué:
  . occasionnellement par des troncs de plus de 20 cm de diamètre,
  . par des troncs entrant dans la machine perpendiculairement à l'axe du tambour et évitant ainsi d'être cisaillés par les couteaux.
- la capacité de la benne n'était pas utilisée au maximum puisque les résidus apportés par le convoyeur avaient tendance à former un cône au centre, au lieu de remplir également l'espace disponible.
- la capacité du convoyeur était parfois insuffisante pour le volume de résidus ramassés par le tambour, ce qui ralentissait le système et causait une baisse de productivité.

Étant donné les nombreux problèmes rencontrés, les essais furent interrompus au mois d'août afin de permettre une révision complète du système hydraulique, et de corriger les autres problèmes reliés au système d'entraînement.

2. Essais de performance

Les essais ont repris au mois de septembre 1982 au même endroit. Le personnel de FERIC a alors entrepris une courte étude de productivité qui a été affectée par quelques bris mécaniques, même s'ils étaient moins fréquents qu'avant.

Conditions d'essais

L'aire d'essais consistait en un terrain de 2,2 ha coupé à blanc durant la saison 1980-81 à l'aide d'une abatteuse-porteuse de bois courts Koehring. Le peuplement original était composé d'épinette noire (Picea mariana [Mill.] B.S.P.) et de pin gris (Pinus banksiana Lamb.), avec un volume moyen de 90 à 130 m^3/ha et une hauteur moyenne de 15 à 18 m.

Le terrain d'essais était plat et passablement dépourvu d'obstacles (figure 11). Selon les normes de l'A.C.P.P.P., le terrain était classifié 1.2.1 (Mellgren, 1980). Il n'y avait pas d'arbres résiduels ni de boulders; les souches constituaient les seuls obstacles. Un sommaire des conditions de terrain, basé sur six parcelles-échantillons de 50 m^2 (intensité d'échantillonnage = 1,4%) est présenté au tableau 2.

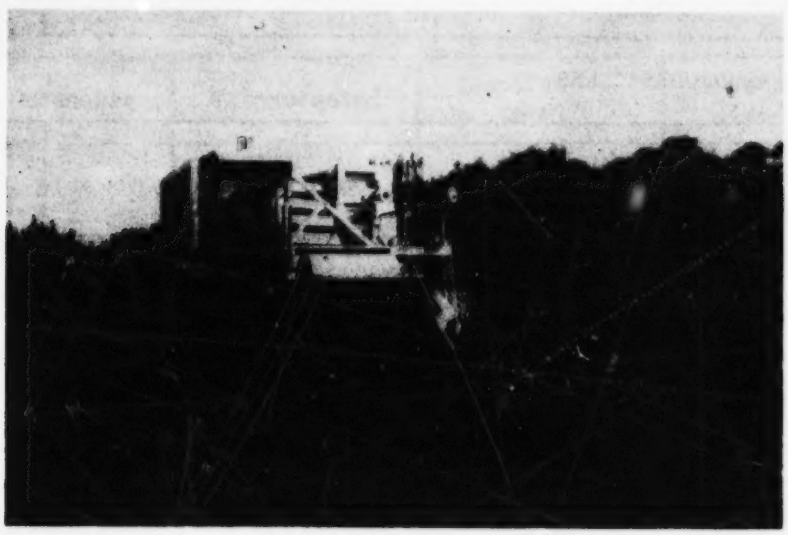


Figure 11. Le RECUFOR sur le site des essais.

Avant le début des tests de performance, les résidus d'exploitation avaient en moyenne 29,4 cm d'épaisseur et couvraient environ 41% de la superficie. Les résidus étaient généralement disposés en lignes parallèles, tels qu'on les retrouve habituellement lors d'opérations d'abatteuses-porteuses de bois courts Koehring. Le tableau 3 donne une description des résidus avant récupération, basée sur une parcelle-échantillon de 400 m^2 (intensité d'échantillonnage = 1,8%).

Tableau 2. Sommaire des conditions du terrain

CARACTÉRISTIQUES DU SOL	
Pente moyenne (%)	0
Texture du sol	sablonneuse
Régime hydrique	sec
Épaisseur moyenne d'humus (cm)	7
Profondeur moyenne du sol (cm)	30+
IRRÉGULARITÉ DU TERRAIN	
Nombre de souches à l'hectare	800
Diamètre moyen des souches (cm)	21,4
Hauteur moyenne des souches (cm)	25,6
Classe d'irrégularité du terrain (%)	
10-30 cm	75
30-50 cm	21
50-70 cm	4
PRÉSENCE DE BROUSSAILLES	
Nombre de gaules à l'hectare	200
Hauteur moyenne (m)	1,8

Tableau 3. Description des résidus d'exploitation avant récupération

CLASSE DE RÉSIDUS	POIDS VERT (t/ha)	%
Branches	13,1	20
Troncs	51,7	80
Total	64,8	100

Résultats des essais

Pendant les essais, l'évaluation du RECUFOR a été basée sur un certain nombre de critères.

a. Vitesse de la machine

La vitesse de la machine a été mesurée dans différentes conditions de fonctionnement. Tous les essais ont été effectués alors que le moteur tournait à 2 600 tpm; les résultats sont présentés au tableau 4.

Tableau 4. Vitesse de déplacement du RECUFOR

ESSAIS STATIQUES			
Vitesse du tambour de ramassage (tpm)			17
Vitesse du convoyeur (tpm)			13
ESSAIS DYNAMIQUES			
Conditions d'essais	Transmission	Temps/100 m (min)	Vitesse (km/hre)
Coupe rase, plat	hydrostatique	3,10	1,94
Sable mouillé, plat	hydrostatique	2,98	2,01
	méc. 1e vitesse	1,02	5,88
	méc. 2e vitesse	0,63	9,52
Chemin, plat	hydrostatique	2,83	2,12
Chemin, pente ascendante de 9%	hydrostatique	3,32	1,81
	méc. 1e vitesse	1,36	4,41

b. Productivité

Le tableau 5 donne un sommaire des temps élémentaires (définis à l'annexe 1) et de la productivité de la machine, de même qu'une description des facteurs opérationnels qui prévalaient durant la période d'essais de 3 jours. Un sommaire des temps morts est présenté au tableau 6.

Tableau 5. Production et conditions d'essais du RECUFOR

CONDITIONS D'ESSAIS	moyenne	écart-type
Période des essais	septembre 1982	
Classification du terrain	1.2.1	
Durée de l'étude de temps (HMP)	6,4	
Nombre de charges	8	
Distance de déplacement à vide(m)	139	35
Nombre de bandes par charge	2	0,8
Longueur totale de bande par charge (m)	212	46
Distance de déplacement en charge (m)	148	88

TEMPS ÉLÉMENTAIRES	Temps par charge (min)		
	moyenne	écart-type	%
Déplacement à vide sur chemin	2,55	1,22	5,3
Dépl. à vide sur l'aire de coupe	1,80	1,05	3,7
Récupération des résidus	20,15	1,96	41,7
Déplacement entre les bandes	3,23	3,08	6,7
Déplacement en charge sur l'aire de coupe	2,45	1,02	5,1
Déplacement en charge sur chemin	1,69	1,16	3,5
Manoeuvres	0,48	0,61	1,0
Déchargement	3,53	1,77	7,3
Temps morts*	12,45	6,62	25,7
Temps total par cycle	48,33	9,58	100

PRODUCTION	moyenne	écart-type
Volume par charge (m^3)	20,5	5,3
Poids par charge (tonne verte)	2,73	0,60
Productivité (tonne verte/HMP)	3,39	

* Les temps morts n'incluent que ceux qui se situent entre 0,05 min et 15 min. Les temps morts inférieurs à 0,05 min sont inclus dans l'élément de temps pendant lequel ils se sont produits, alors que ceux supérieurs à 15 min n'étaient pas considérés comme temps productif et ont donc été exclus de l'échantillon.

Tableau 6. Sommaire des temps morts

CATÉGORIE DE TEMPS MORTS	CAUSE	TEMPS MORTS (min)	FRÉQUENCE	% DU TEMPS TOTAL
Soulèvement du tambour de ramassage	branchages	0,32	1	0,1
	souches	1,50	3	0,4
	indéterminée	9,05	16	2,3
		10,87	20	2,8
Blocage du tambour	branchages	14,44	4	3,7
	souches	0,21	1	0,1
	volume	7,29	38	1,9
	indéterminée	7,86	28	2,0
		29,80	71	7,7
Blocage du convoyeur	branchages	9,79	2	2,5
	indéterminée	12,57	11	3,3
		22,36	13	5,8
Mécanique	lame du convoyeur	5,79	2	1,5
	autres	11,70	5	3,0
		17,49	7	4,5
Dégagement des résidus		9,10	9	2,3
Opérateur		10,01	8	2,6
		=====	===	====
Total		99,63	128	25,7

c. Caractéristiques des charges de résidus

Tel qu'indiqué dans le tableau 5, le poids de la charge atteignait en moyenne 2 729 kg ou 2,73 tonnes vertes de matériel organique. De plus, les charges contenaient 57 kg (2%) en moyenne de sol minéral. Le volume moyen des charges atteignait 20,5 m^3, pour une densité moyenne de 133 kg/m^3. Le tableau 7 décrit la composition des résidus, et on voit à la figure 12 une charge de résidus après déchargement.

Tableau 7. Caractéristiques des résidus récoltés (matière organique)

TYPE DE RÉSIDUS	% du poids total de la charge		teneur en humidité (base anhydre)
Branchages		57,5	36,7
Troncs (diam. de 7,5 à 17,5 cm)			
longueur <40 cm	6,2	} 37,4	} 45,7
longueur >40 cm	31,2		
Troncs (diam. >17,5 cm)		0,2	40,8
Souches		4,9	67,4
Total		100	41,6

Figure 12. Résidus récoltés, après déchargement.

3. Discussions

La productivité du prototype du RECUFOR n'a atteint en moyenne que 3,39 t vertes/HMP ou 2,39 t sèches/HMP. Deux raisons principales expliquent cette faible production. La vitesse du RECUFOR lors de la récupération des résidus a été plus basse que prévue, et la proportion du temps total passé à la récupération proprement dite a été plutôt faible.

Il avait été prévu que le RECUFOR se déplacerait sur l'aire d'essais en récupérant les résidus à une vitesse de 1,6 km/heure, alors qu'en fait la vitesse moyenne atteinte durant l'étude a été de 0,63 km/heure. Cela signifie que le RECUFOR n'a pu couvrir que 40% de la superficie à traiter prévue par heure de récupération.

Le temps de récupération n'a constitué que 42% du temps total productif, alors que les temps morts représentaient 26% du temps total productif. Le blocage du tambour ou du convoyeur représentait 52% des temps morts, principalement à cause des souches, des troncs qui se présentaient perpendiculairement au tambour, ou d'un trop grand volume de résidus ramassés à la fois pour la capacité du convoyeur.

Tableau 8. Comparaison entre la productivité prévue (1980) et mesurée (1982)

FACTEURS DE PRODUCTIVITÉ	PRÉVISIONS DE 1980	RÉSULTATS DE 1982
Largeur du tambour de ramassage	1,83 m	1,83 m
Volume de la benne	capacité: 40 m³	utilisé: 20,5 m³
Vitesse de récupération du RECUFOR	1,6 km/h	0,63 km/h
Vitesse de déplacement du RECUFOR	4,8 km/h	2,5 km/h
Densité des résidus sur le terrain (prévisions selon FRUL, 1980 - épinette noire)	112,8 tonnes vertes/ha	64,8 tonnes vertes/ha
	56,4 tonnes sèches/ha	45,8 tonnes sèches/ha
Productivité	10,2 tonnes vertes/HMP	3,39 tonnes vertes/HMP
	5,1 tonnes sèches/HMP	2,39 tonnes sèches/HMP

Étant donné la mauvaise distribution des résidus dans la benne, le volume moyen des charges récupérées n'atteignait qu'environ 50% de la capacité totale de la benne. Une plus grande proportion de temps que prévu s'est donc trouvée allouée aux déplacements et au déchargement par unité de volume récupérée.

On estime qu'il serait possible d'atteindre une productivité de 4,5 tonnes vertes par HMP en apportant les modifications suivantes au RECUFOR:

- améliorer la conception des lames du tambour et du mode de cisaillement afin de minimiser les blocages et la quantité d'impuretés; la proportion des temps morts devrait être réduite à 10% du temps de cycle, comme pour toute machine opérationnelle;
- modifier la conception du convoyeur de façon à augmenter sa capacité, et installer un système de distribution des résidus qui permette de remplir la benne uniformément;
- réduire le poids total du RECUFOR (voir p. 12);
- augmenter la puissance totale (450 hp) du RECUFOR.

Cependant les résultats obtenus lors des essais de performance et les résultats de productivité anticipés après les modifications proposées ne s'appliquent qu'à des conditions de terrain presqu'idéales (terrain solide, plat et sans obstacles majeurs). Il est probable que la productivité du RECUFOR diminuerait dans des conditions plus difficiles. Il faudrait évaluer la version améliorée du RECUFOR dans diverses conditions de pente et de densité de résidus. La pression élevée au sol du RECUFOR pourrait empêcher l'utilisation de la machine sur des sols à faible portance.

La firme Corporation de Recherche - Logging Development a estimé en juin 1983, qu'un RECUFOR opérationnel coûterait environ 400 000 $ à l'achat et que les coûts de fonctionnement se répartiraient comme suit:

Facteurs servant au calcul des coûts de fonctionnement du RECUFOR (juin 1983)

Coût d'achat	400 000 $
Durée de vie	20 000 heures
Heures de fonctionnement/année (ne fonctionne pas en hiver)	2 000 heures/an
Réparation, selon un % d'amortissement	200%
Investissement moyen	200 000 $
Intérêt et assurance selon un % de l'investissement moyen	12% année
Coûts directs en main d'oeuvre	15 $/heure
Carburant et lubrifiants	0.50 $/L

Coûts de fonctionnement

Amortissement 400 000/20 000	20 $/heure
Intérêt et assurance 200 000 x 0,12/2000	12 $/heure
Réparations et entretien 2 x 20	40 $/heure
Carburant et lubrifiants 70L x 0.50	35 $/heure
Opérateur	15 $/heure
Total	122 $/heure

En utilisant une valeur moyenne de 20 MJ/kg anhydre de résidus forestiers effectivement ramassés (Kryla, 1984), la valeur calorifique de 2,39 tonnes sèches récupérées par heure serait de 45 000 MJ. En appliquant un coefficiant de récupération d'énergie de 70% en raison de la teneur en humidité des résidus (Tillman, 1981) l'énergie recouvrable serait alors de 31 500 MJ/heure. Le coût de récupération s'établirait approximativement à 122 $/heure divisé par 31,5 GJ/heure ou 3.87 $/GJ.

En janvier 1985, le prix d'un m^3 de pétrole brut s'établissait à 253.31 $ à Montréal. La valeur énergétique moyenne d'un m^3 de pétrole brut étant environ de 39.5 GJ/m^3, on obtient donc un coût de 6.38 $/GJ.

Le coût de récupération de l'énergie, soit 3.87 $/GJ (dans des conditions idéales), représente déjà 60% de la valeur du marché de 6.38 $/GJ et laisse donc une faible marge pour absorber les coûts qu'impliquent le transport jusqu'au site d'utilisation, une fragmentation secondaire par broyage ou déchiquetage, la manutention jusqu'à la chaudière, etc.

Compte tenu du niveau de développement actuel du RECUFOR, il semble que les essais entrepris durant l'été 1982 ont démontré que le concept de la récupération des résidus sur le parterre de coupe est techniquement réalisable, mais que les perspectives économiques et de rentabilité n'en favorisent pas l'application.

D. Changement de contexte

Au cours de la période 1980-82, période durant laquelle le développement et l'évaluation du RECUFOR ont eu lieu, plusieurs changements se sont manifestés dans le contexte initiateur du programme ENFOR.

Premièrement, le prix international du pétrole brut a atteint un plafond en 1981 suivi d'une légère regression (figure 13), prenant par surprise les prévisions à la hausse des experts. Ce mouvement des prix rendait du même coup les sources d'énergie nouvelles moins attrayantes économiquement, particulièrement celles qui demandaient plusieurs manutentions et/ou transformations avant d'être utilisées, comme les résidus forestiers laissés sur les parterres de coupe.

En second lieu, on observe (figure 14) qu'à partir de 1979, la méthode d'exploitation par arbres entiers prend de plus en plus d'importance relative, passant de 9% en 1979 à près de 30% en 1983, de toute la production de bois rond. On prévoit que cette tendance se poursuivra au cours des prochaines années, ce que semble confirmer le nombre croissant d'ébrancheuses mécaniques en bordure de route. La popularité du système d'exploitation en bois courts devrait aller en diminuant, alors que le déchiquetage des arbres entiers en forêt pourrait prendre de l'ampleur. Ces changements dans les méthodes de récolte ont d'importantes répercussions dans la localisation des résidus d'exploitation.

Dans le système d'exploitation par arbres entiers, les arbres sont ébranchés mécaniquement en bordure de route, et les troncs, branches et houppiers se retrouvent concentrés en un endroit d'accès plus facile, ce qui représente un avantage évident par rapport aux résidus laissés sur le parterre de coupe, avec la méthode par bois courts.

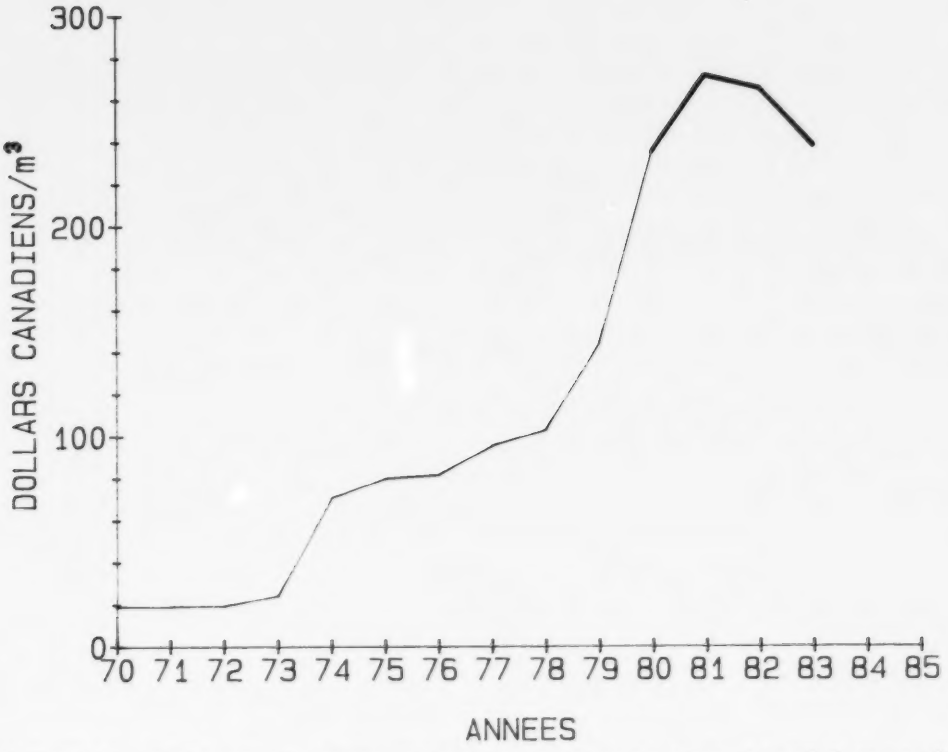


Figure 13. Prix moyen international du pétrole brut livré à Montréal.

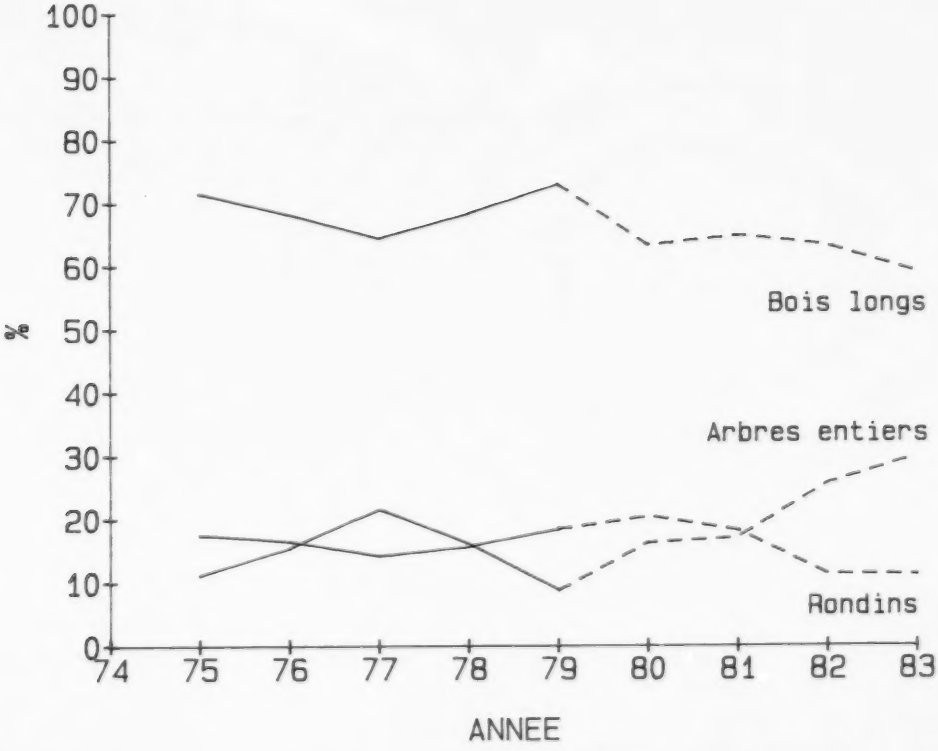


Figure 14. Pourcentage de la production annuelle totale de bois ronds au Canada pour chacune des méthodes d'exploitation (ACPPP, 1984).

Compte tenu de ce changement de contexte important, déjà noté en 1981, ainsi que des résultats de l'évaluation économique du RECUFOR, le programme de récupération des résidus forestiers s'orienta vers les résidus laissés en bordure de route après l'ébranchage des arbres entiers.

Dès 1981, on entreprit les plans d'un nouveau prototype qui incorporerait deux des principes originaux du RECUFOR:

1. Le tambour du RECUFOR servirait à une première fragmentation des résidus forestiers; le rouleau serait alimenté verticalement à l'aide d'une flèche d'alimentation coulissante;

2. Un broyeur à marteaux ordinaire (hammermill) servirait à la fragmentation secondaire des résidus forestiers.

Un prototype, du nom de LRP (Logging Residue Processor: fragmenteuse-broyeuse de résidus) fut construit durant la période 1983-84 et une évaluation préliminaire eut lieu en 1984. La prochaine section décrit plus en détails le développement du LRP.

III - LE LRP

A. Généralités

Pour chaque tonne de bois ronds récoltée, environ une demi-tonne de troncs, branches, houppiers et feuillage est laissée en bordure de route après l'ébranchage d'arbres entiers. La quantité importante de ces résidus forestiers est illustrée par le fait que plus de 300 ébrancheuses mécaniques sont actuellement mises en oeuvre au Canada. C'est donc dire que cette quantité de résidus ligneux concentrée en un endroit privilégié, représente une source potentielle d'énergie considérable. L'utilisation de ces résidus offrirait de plus l'avantage de libérer des superficies forestières productives, présentement recouvertes de débris, et de réduire les risques d'incendie.

Déjà en 1981, différents organismes s'étaient montrés intéressés à la récupération des résidus en bordure de route à des fins énergétiques. Divers essais de solution ont conduit au développement de prototypes expérimentaux dont quelques-uns ont même atteint un stade commercial. Pour assurer le succès du développement du LRP, il était donc essentiel de tenir compte des caractéristiques des résidus visés et de considérer dès le début des critères de productivité élevés.

Dans le cadre de l'entente FERIC/ENFOR, il fut décidé en 1983 de procéder à la construction du prototype LRP, selon les plans soumis par LDC. Cette étape prit fin en 1984 alors qu'une série de tests préliminaires ont été effectués. Le développement, la construction et les essais du LRP furent réalisés sous la direction de la firme Corporation de Recherche - Logging Development de Montréal. La Division des projets spéciaux de FERIC supervisa les différentes étapes du projet.

B. Description du prototype

Le LRP (figures 15 et 16) est une machine automotrice montée sur roues, capable de se déplacer sur les chemins d'exploitation. À l'aide d'une flèche d'alimentation coulissante et d'un grappin, elle saisit les résidus forestiers laissés par les ébrancheuses mécaniques, et les introduit dans le tambour de cisaillement. De ce dernier, les résidus cisaillés passent par un broyeur à marteaux et sont ensuite soufflés dans une goulotte d'évacuation jusqu'à la benne d'un camion. Les composantes principales du LRP font l'objet d'une brève description dans les paragraphes suivants.

1. Châssis

Plusieurs composantes du RECUFOR furent réutilisées pour la construction du LRP. Le chassis de base du RECUFOR provenant d'un débardeur conventionnel Clark 880 en est un exemple. L'utilisation des composantes disponibles entraîna une réduction appréciable des frais de construction.

2. Tambour de cisaillement

Le tambour de ramassage du RECUFOR (ci-après appelé tambour de cisaillement) fut aussi réutilisé. Quelques modifications mineures furent apportées afin de l'adapter au LRP. L'alimentation verticale du tambour permet de présenter les

résidus forestiers sans orientation définie. L'avantage du tambour est de fournir un débit assez constant au broyeur même lorsque l'alimentation se fait à pleine capacité.

Figure 15. Le LRP (Logging Residue Processor: fragmenteuse-broyeuse de résidus).

3. Broyeur

Un broyeur à marteaux Jeffrey 45WB a été installé sur le LRP. L'utilisation d'un broyeur permet d'obtenir une fragmentation finale des résidus. De plus l'homogénéité des particules obtenues est à même de favoriser leur manutention, leur séchage et leur combustion. Un broyeur présente aussi l'avantage d'être très peu sensible aux impuretés présentes dans les résidus, contrairement aux déchiqueteuses.

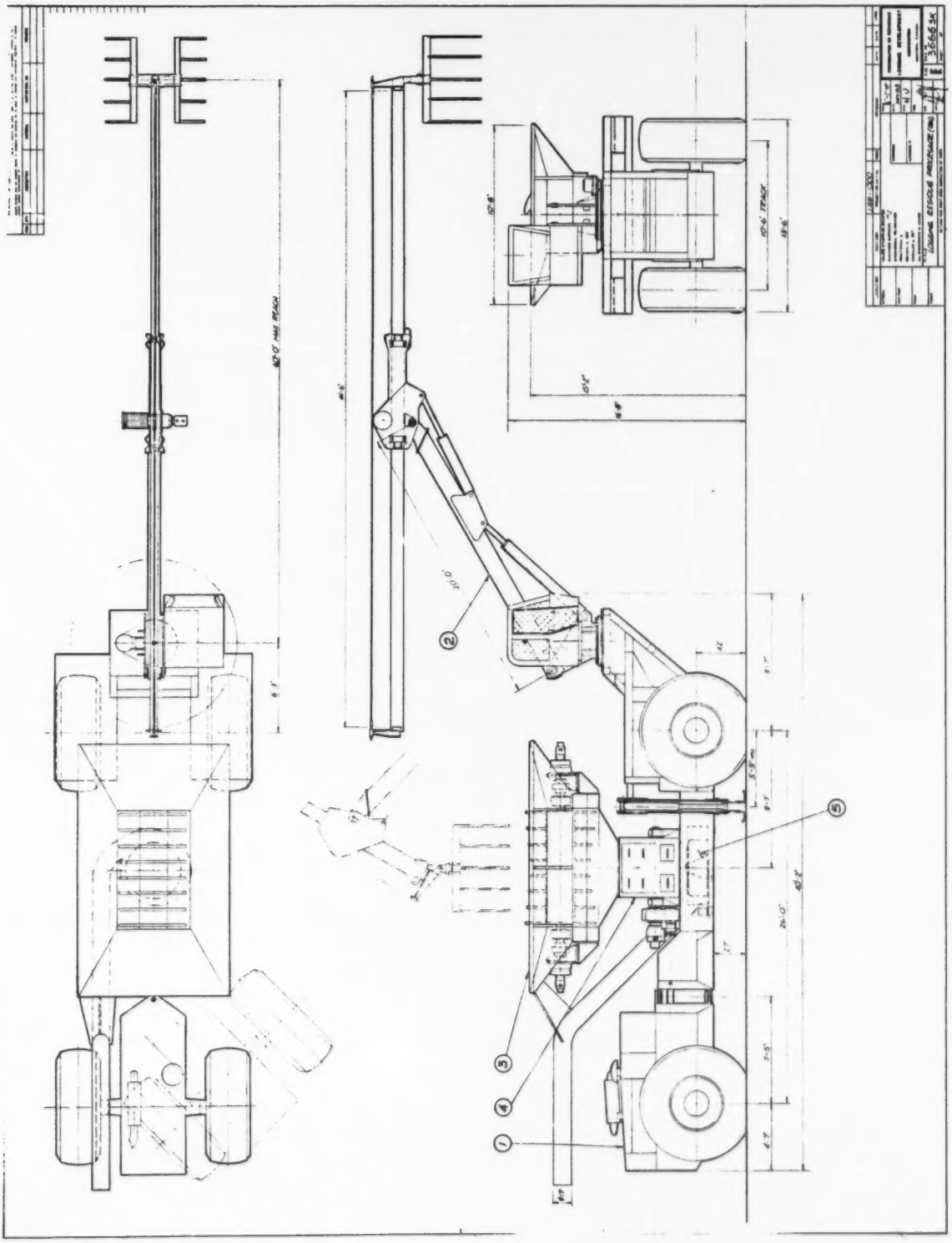
4. Souffleur horizontal

Un souffleur horizontal, auquel est raccordé une goulotte d'évacuation, permet de transférer directement les particules de la sortie du broyeur jusqu'à la benne d'un camion. Bien que la goulotte ait un coude à 45°, il n'y a pas d'engorgement de particules dans le conduit. La puissance du souffleur est de 37 kW.

5. Flèche d'alimentation

Le LRP possède une flèche d'alimentation coulissante munie d'un grappin, dont la portée approximative de 18,3 m (60 pieds) est compatible avec celle de la plupart des ébrancheuses mécaniques conventionnelles. La capacité du grappin est de 500 kg. La flèche d'alimentation et la cabine sont montées sur une tourelle.

Figure 16. Prototype du LRP.



C. Évaluation préliminaire du LRP

1. Objectifs

Une courte série d'essais a été entreprise peu après la construction du LRP, premièrement en vue de s'assurer du bon fonctionnement des composantes principales, et deuxièmement afin de mesurer quelques paramètres de productivité. Le lecteur ne doit toutefois pas oublier que les résultats obtenus ne sont que préliminaires et serviront principalement à planifier une évaluation plus complète du prototype. Ils ne devraient pas être appliqués dans un autre contexte.

Les essais avaient pour but:

1. de mesurer le temps de fragmentation d'une prise de grappin d'un poids donné;
2. de déterminer les temps du cycle d'alimentation, selon deux positions principales: de l'avant et de côté;
3. d'estimer le potentiel de productivité du LRP;
4. d'établir la distance maximale de projection des particules à la sortie du souffleur modifié;
5. d'obtenir une quantité suffisante de particules pour procéder à une analyse de dimension et de densité.

2. Conditions d'essais

Les essais ont eu lieu dans le parc d'une usine, où des piles de résidus de six pieds de hauteur avaient été placées en rangées. Les résidus se composaient de pruches, d'épinettes, de cèdres et de quelques trembles de petite taille, récemment abattus. Le diamètre ne dépassait jamais 13 cm.

La durée des tests a été de 2,5 jours. La température ambiante était inférieure à -12°C la première journée, et au dessus de +3°C les deux suivantes. Seulement 11 charges ont pu être mesurées. Chacune d'elles était en premier lieu attachée et pesée. Ensuite elle était détachée et agrippée par la flèche d'alimentation, pour être amenée au-dessus du tambour de cisaillement. Le temps de transformation de la charge commençait au moment où le grappin lâchait sa prise dans le tambour, pour se terminer lorsque les particules produites étaient toutes soufflées hors de la goulotte d'évacuation.

3. Résultats

Le tableau 9 présente les temps de fragmentation des 11 charges étudiées. Les taux varient de 9,1 tonnes/HMP jusqu'à 40,9 tonnes/HMP pour une charge très pesante et une charge moyenne, respectivement.

Le tableau 10 donne le temps du cycle d'alimentation moyen obtenu durant les essais, soit 1,07 min/cycle. La charge moyenne étant de 400 kg, le taux d'alimentation s'établissait à 22,5 t/HMP. Le souffleur pouvait projeter les particules d'une distance de 9 à 15 m à partir de l'extrémité de la goulotte. La densité des particules, mesurée en remplissant un contenant de 1,5 m^3 directement à la sortie de la goulotte, était de 367 kg/m^3. Les résidus ont été analysés par Forintek (Ottawa), et les résultats sont présentés à l'annexe III.

Tableau 9. Temps et taux de fragmentation des charges

Numéro de la charge	Poids de la charge (kg)	Temps de fragmentation (minutes)	Taux de fragmentation (tonnes/HMP)
Série "A" (neige sèche, temp. = -12°C)			
1	341	0,52	39,6
2	327	0,75	26,2
3	418	1,00	25,1
4	227	0,67	20,4
moyenne	328	0,76	25,9
Série "B" (neige mouillée, temp. = +3°C)			
5	386	0,57	40,9
6	364	1,62	13,5
7	369	1,93	11,5
8	409	1,72	14,3
moyenne	380	1,47	15,5
Série "C" (neige mouillée, temp. = +3°C)			
9	591	3,50[1]	10,1
10	523	2,75[1]	11,4
11	591	3,90[2]	9,1
moyenne	568	3,41	10,0

[1] Prise de la charge en deux temps
[2] Alimentation du tambour en 2 étapes

Tableau 10. Temps du cycle d'alimentation

Temps élémentaires	Description	Temps moyen mesuré (min/charge)
Chargement	Soulèvement de la charge, rétraction de la flèche, rotation et relâchement de la charge	0,56
Retour	Rotation, extension et abaissement de la flèche	0,26
Prise	Recherche et prise d'une charge (estimé)	0,25
	Total	1,07

4. Discussions

Les taux de fragmentation obtenus variaient de 9 t/HMP à 40 t/HMP. Les résultats les plus faibles se trouvent dans la série C, où le poids moyen des charges (568 kg) dépassait la capacité nominale du grappin. Cependant les temps moyens de fragmentation plus élevés pour ces charges sont probablement dûs à un manque de puissance au niveau du tambour de cisaillement, indiquant que le poids moyen des charges de cette série a dépassé le poids optimal pour la capacité du tambour.

Les résultats des essais semblent indiquer qu'il serait possible, avec une machine commerciale, d'atteindre un temps moyen du cycle de fragmentation de 1 min/charge pour une charge moyenne de 410 kg. Le taux de fragmentation serait alors d'environ 24 tonnes/HMP, ou de 20 tonnes/HMPv, en supposant un facteur d'utilisation du LRP de 80%*.

La température ambiante lors des opérations pourrait influencer les taux de réduction. Sous des températures inférieures au point de congélation, les résidus, alors plus fragiles, seraient plus faciles à briser, ce qui augmenterait les taux de fragmentation. L'inverse s'appliquerait aussi à des températures au-dessus du point de congélation.

Avec un cycle d'alimentation moyen de 1,07 min./cycle (ou 56 cycles/HMP) pour une charge moyenne de 400 kg, le taux actuel d'alimentation de la flèche du LRP est d'environ 22 t/HMP ou 18 t/HMPv (facteur d'utilisation de 80%). Pour atteindre un taux d'alimentation minimum de 20 t/HMPv, il faudrait réduire le temps de cycle d'alimentation à un maximum de 0,96 min/cycle (i.e. un minimum de 63 cycles/HMP).

Compte tenu du stade de développement atteint, une étude systématique permettrait de déterminer avec plus de précision le niveau de productivité actuel du LRP, et d'identifier les améliorations nécessaires à apporter au prototype en vue de le rapprocher de l'étape de production commerciale. La très courte étude déjà entreprise ne peut en aucun cas remplacer les études systématiques de courte et/ou de longue durée habituellement effectuées avec un prototype de ce genre. Elle a toutefois laissé entrevoir la possibilité d'un niveau de productivité de 20 tonnes/HMPv.

---

* Facteur d'utilisation = $\frac{\text{Heures-machines productives (HMP en poste) x 100\%}}{\text{Heures machines prévues (HMPv)}}$

CONCLUSIONS

Les priorités accordées à la récupération des résidus d'exploitation forestière se sont modifiées considérablement au cours des dernières années. Durant la phase d'implantation du programme ENFOR par le Service canadien des forêts, plusieurs facteurs favorisaient la récupération des résidus laissés sur le parterre de coupe. La période suivante, i.e. la fin des années 1970, a été caractérisée par plusieurs changements dans le contexte global (énergétique, forestier, etc.) d'utilisation de la biomasse forestière. Ces changements ont modifié l'orientation du mandat accordé à FERIC, transférant l'intérêt de la récupération de la biomasse laissée sur les parterres de coupe, vers l'utilisation des résidus laissés en bordure de route après l'ébranchage d'arbres entiers.

Le principe de la récupération des résidus laissés sur les sites d'exploitation présente, dans les conditions actuelles, bon nombre d'inconvénients; un programme de recherche et de développement en ce sens n'est donc plus à-propos. Ces résidus constituent en effet la source de biomasse forestière la plus dispendieuse à récupérer. Leur utilisation économique ne peut se justifier que dans un contexte énergétique particulier où il existe une forte demande d'énergie de remplacement provenant de sources non traditionnelles. Cette conjoncture apparaissait favorable au début du programme ENFOR, mais les prévisions énergétiques de l'époque ne se sont pas réalisées: la pénurie de pétrole ne s'est pas matérialisée et la consommation mondiale a même légèrement chuté, entraînant une diminution du prix international. De plus la pénétration sur le marché d'une autre source énergétique importante, le gaz naturel, a affecté la demande d'énergie de remplacement. Ces nouveaux éléments ont entraîné un rajustement dans l'approche touchant l'exploitation de la biomasse forestière.

L'expérience du RECUFOR aura été très positive à plusieurs points de vue. Même si la période de développement du RECUFOR a été très courte, puisque le changement de contexte a vite modifié l'orientation des projets de récupération de la biomasse, l'expérience et la technologie développées avec ce prototype ont été précieuses lors de la construction du deuxième prototype, le LRP.

Dans le climat énergétique actuel, les développements technologiques visant la récupération en bordure de route des résidus à des fins énergétiques devraient éventuellement répondre aux besoins des utilisateurs de la matière ligneuse. La fabrication du prototype LRP constitue un pas dans ce sens, et les essais préliminaires effectués à l'automne 1984 semblent indiquer que le potentiel de productivité du LRP pourrait atteindre un seuil de rentabilité. Il pourrait en ce cas représenter une alternative intéressante au brûlage des résidus. Cependant, une évaluation plus complète du prototype devrait être réalisée afin de mesurer plus précisément les niveaux de productivité actuels du LRP dans différentes conditions d'opération. La révision des problèmes techniques observés durant une étude plus élaborée permettrait de mieux évaluer l'avenir du LRP.

BIBLIOGRAPHIE

Association canadienne des producteurs de pâtes et papiers, 1984. Sommaire des rapports d'opérations forestières, 1982 ou 1982-83. Division des bois et forêts, A.C.P.P.P., Montréal. 24 pp.

Cheremisinoff, Nicola P., 1980. Wood for energy production. Energy technology series Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers. 152 pp.

F.R.U.L., 1981. Inventaire de la biomasse résiduelle après coupe. Rapport Spécial N°RS-13, Projet ENFOR P-28. FERIC, 143 Place Frontenac, Pointe Claire (Québec) H9R 4Z7. 172 pp.

Kryla, J.-M., 1984. Determination of available heat of combustion data for Canadian woody species. ENFOR Projet P-256. Service canadien des forêts, Ottawa. 89 pp.

Mellgren, P.G., 1980. Classification du terrain pour la foresterie du Canada. Association canadienne des producteurs de pâtes et papiers. Montréal (Québec). W.S.I. 2840F. 13 pp.

Ministère de l'Énergie et des Ressources, 1984. Les statistiques de l'énergie au Québec, 1983. Direction des communications du M.E.R. 80 pp.

Tillman, D.V.; Rossi, A.J.; Kotto, W.D., 1981. Wood combustion principles, processes and economics. Academic Press. 208 pp.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DU RECUFOR

Longueur totale	12,98 m	42' 7''
Hauteur maximale	4,09 m	13' 5''
Largeur maximale	4,01 m	13' 2''
Largeur du tambour de ramassage	1,83 m	6' 0''
Diam. du tambour de ramassage (lames incluses)	1,83 m	6' 0''
Poids total	37 000 kg	83,000 lbs
Puissance (moteur du débardeur Clark 880)	240 kw	320 hp
Capacité en volume de la benne	40 m^3	1,410 pi^3
Vitesse du tambour	16 tpm	
Vitesse de déplacement théorique du RECUFOR au travail	2,4 km/heure	

ANNEXE II

FICHE TECHNIQUE DU LRP

Longueur totale	12,34 m
Largeur maximale	4,11 m
Hauteur maximale	5,08 m
Portée de la flèche coulissante	18,28 m
Capacité du grappin	500 kg
Poids total	36 000 kg
Puissance du moteur	240 kw

ANNEXE III

DÉFINITION DES TEMPS ÉLÉMENTAIRES

Déplacement à vide sur chemin

Débute lorsque la machine quitte le site de déchargement après déchargement, et se termine lorsque la machine quitte le chemin pour entrer sur l'aire de coupe.

Déplacement à vide sur l'aire de coupe

Débute lorsque la machine quitte le chemin pour entrer sur l'aire de coupe et se termine lorsque le tambour de ramassage commence la récupération des résidus.

Récupération des résidus

Débute lorsque le tambour de ramassage commence à tourner et se termine lorsqu'une pleine charge a été ramassée et que le tambour arrête de tourner. Le temps de récupération peut être interrompu par le "déplacement entre les bandes".

Déplacement entre les bandes

Débute lorsque la machine a complété la récupération d'une bande de résidus et se termine lorsqu'elle commence la bande suivante.

Déplacement en charge sur l'aire de coupe

Débute lorsque le tambour de ramassage arrête de tourner alors que la charge est complète et se termine quand la machine quitte l'aire de coupe.

Déplacement en charge sur chemin

Débute lorsque la machine atteint le chemin et se termine lorsque la machine débute sa manoeuvre en vue du déchargement à la jetée.

Manoeuvre

Temps consacré à orienter la machine pour son déchargement. Débute quand la machine atteint le site de déchargement et se termine quand la machine arrête juste avant le déchargement.

Déchargement

Débute lorsque la machine s'est arrêtée pour décharger et se termine quand la machine repart à nouveau à vide.

ANNEXE IV

ANALYSE DES RÉSIDUS PRODUITS PAR LE LRP

Un échantillon de 13 kg de résidus de résineux produits par le LRP a été livré aux laboratoires de Forintek (Ottawa) par M. D. Hamilton (Corporation de Recherche - Logging Development) le 12 décembre 1984 pour fins d'analyse. Les résultats de cette analyse sont présentés ici.

1. Teneur en humidité

Trois sous-échantillons ont été tirés du matériel reçu et séchés au four à une température de 105°C. Les teneurs en humidité (base humide) déterminées étaient les suivantes:

sous-échantillon 1: 45,7%
sous-échantillon 2: 49,1%
sous-échantillon 3: 50,6%
moyenne: 48,5%

2. Densité en vrac

La densité en vrac du matériel reçu a été déterminée en utilisant une boîte cubique en contre-plaqué de 0,0283 m^3 (1 pi^3) pour trois conditions: tel que reçu (tassement par gravité), après brassage et après un léger compactage (10 kPa [1.5 psi]).

	poids humide/volume humide		poids sec/volume humide	
	kg/m^3	lb/pi^3	kg/m^3	lb/pi^3
tassé par gravité	294	18,3	151	9,4
brassé	414	25,9	213	13,3
compacté légèrement	553	34,5	285	17,8

3. Grosseur des particules

Le matériel fut séché au laboratoire à la température de la pièce dans des conditions d'aération forcée afin d'accélérer le séchage et de prévenir une dégradation biologique. Le matériel fut ensuite introduit dans un séparateur de modèle KASON K.18.1.CS équipé des tamis suivants: 1M (1 pouce), 2M (1/2 pouce), 4M (1/4 pouce) et 20M (1/20 pouce).

Tamis	Poids sec (g) (séché à l'air)	%
1M (1 pouce +)	1 908,3	29,0
2M (1/2 - 1 pouce)	2 191,2	33,3
4M (1/4 - 1/2 pouce)	1 451,7	22,0
20M (1/20 - 1/4 pouce)	949,1	14,4
Particules fines (plus petites que 1/20 pouce)	85,0	1,3
Total	6 585,3	100,0

4. Valeur calorifique et teneur en cendres

Du matériel tamisé, 1/10 du poids de chaque catégorie (5) à été prélevé pour constituer un échantillon composé de 659 g (teneur en humidité de 5,7%). Cet échantillon fut passé dans un broyeur Wiley N°1 muni d'un tamis de 6,4 mm (.25 po). Le broyat grossier obtenu a été parfaitement mélangé et un sous-échantillon de 50 g à été broyé une seconde fois en utilisant un tamis de 0,5 mm (0.02 po). De petits échantillons furent extraits du produit obtenu et servirent à déterminer la valeur calorifique à l'aide d'un calorimètre PARR, et le contenu en cendres en chauffant dans un four à moufle à 600°C.

Valeur calorifique:

Telle que déterminée: 19,36 MJ/kg (8,330 BTU/lb)
corrigée pour du matériel à 0% d'humidité: 20,54 MJ/kg (8,334 BTU/lb)

Teneur en cendres: 2,93% du poids sec des résidus.